

**UNIVERSIDAD CARLOS III  
DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



***Análisis numérico de larguero de automóvil frente a  
impacto***

**Proyecto Fin de Grado**

***Grado en Ingeniería Mecánica***

*Autor: Víctor Hijas Sánchez*

*Tutor: Josué Aranda*

JUNIO 2017



## **AGRADECIMIENTOS**

En este apartado quiero exponer mi enorme gratitud por las ayudas recibidas a lo largo del grado, las cuales han hecho que siga mejorando día a día. La etapa de la carrera abarca unos años decisivos en la formación tanto a nivel estudiantil como personal.

En primer lugar, quiero agradecer la ayuda que me ha ofrecido mi tutor del proyecto, Josué Aranda. Sus correcciones me han mostrado la manera correcta de gestionar un proyecto. Además, la comunicación y la implicación que ha mostrado hacia mi persona ha transmitido la motivación necesaria para presentarlo de la forma más correcta. Por otro lado, el extenso conocimiento acerca del software de Abaqus que me ha impartido ha sido vital para la realización de gran parte del proyecto.

También me gustaría agradecer la afectuosa ayuda de mi compañero de carrera, Pedro González. Aún en periodo de exámenes pudo sacar tiempo para prestarme una mano con los formatos de la memoria. Sin embargo, el mayor aporte que me ofreció desde el primer día de carrera es su amistad. Pedro ha sido de los mayores apoyos que me ha hecho seguir avanzando en un proyecto que empezamos, y acabaremos juntos.

David Hurtado, compañero de prácticas en la empresa de CTIngenieros, me hizo otro de los aportes desinteresados para una parte del proyecto. Sus avanzados conocimientos que me transmitió sobre el software de Catia hizo posible la modelización de la pieza que se estudia en este proyecto. Además, el manejo de este software utilizado en las grandes empresas de ingeniería repercutirá de manera positiva en mi mundo laboral.

Por último, los consejos y ánimos de mis seres queridos y amigos más cercanos han repercutido en decisiones importantes que han hecho posible que cumpla uno de mis metas en la vida.

**GRACIAS**

## RESUMEN

Este proyecto estudia el elemento principal encargado de la absorción de energía de impactos frontales en vehículos, el larguero. Para empezar, se buscará información sobre características que definen la pieza estudiada y las normas del ensayo que se debe realizar sobre la misma.

Mediante un software de diseño se procederá a realizar un modelo que incorpore una geometría distinta a la original de modo que ofrezca mejores resultados ante la absorción de energía. En una era en la que se apuesta por el avance tecnológico, se ha preferido usar técnicas tradicionales modificando la geometría de la pieza.

Para comprobar la mejoría producida por este cambio, se ha implementado el modelo en un código comercial de elementos finitos que ofrezca como solución el valor de algunos parámetros de especial interés. El objetivo de este proyecto es mejorar la absorción de energía ante impactos del larguero, por lo que los parámetros escogidos para el estudio deben tener relación con dicho propósito. Por tanto, deberá prestarse especial interés a los desplazamientos del larguero y las reacciones en los empotramientos.

El resultado es la comparación de ambos modelos con ambos ensayos donde se podrá comprobar la funcionalidad de esta nueva geometría en el larguero.

## ABSTRACT

This project studies the main element that takes over the energy absorption of frontal impacts in vehicles, the crossbar. To begin, we will look for information about the characteristics that define the piece studied and the norms of the test that must be performed on it.

Using a design software, we will proceed to develop a model that incorporates a geometry different from the original so that it offers better results with regard to energy absorption. In an era in which technological advances are made, it has been preferred to use traditional techniques by modifying the geometry of the piece.

To verify the improvement produced by this change, the model has been implemented in a commercial code of finite elements that offers as solution the value of some parameters of special interest. The objective of this project is to improve the absorption of energy of the crossbar against impact, for this reason the parameters chosen for the study should be related to that purpose. Therefore, special attention should be given to the displacement of the crossbar and the reactions in the clamped area.

The result is the comparison of both models with both tests where it will be possible to verify the functionality of this new geometry in the crossbar.

# ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	9
1.1	SEGURIDAD VIAL .....	12
1.1.1	ESTADISTICA EN LA SINIESTRALIDAD .....	13
1.1.2	NORMATIVA DE HOMOLOGACION DE IMPACTOS.....	17
1.2	OBJETIVOS .....	17
1.3	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	18
2	PARACHOQUES DELANTERO: EVOLUCIÓN Y CARACTERÍSTICAS .....	20
2.1	ESTRUCTURA .....	23
2.2	MATERIALES .....	25
2.3	MANTENIMIENTO .....	26
3	NORMATIVA VIGENTE: NORMA UN94 [13].....	28
3.1	ÁMBITO DE APLICACIÓN .....	28
3.2	HOMOLOGACIÓN .....	29
3.3	ENSAYO.....	29
3.4	OTROS ASPECTOS CONSIDERADOS EN LA UN94.....	32
4	DESARROLLO DEL MODELO.....	33
4.1	ESPECIFICACIONES DEL LARGUERO ORIGINAL.....	33
4.2	DISEÑO .....	36
4.3	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS .....	39
5	RESULTADOS Y COMPARACIONES.....	51
5.1	ÁNÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	51
5.2	ANÁLISIS FRENTE A IMPACTO DEL “LARGUERO ORIGINAL” .....	53
5.3	DISEÑO DEL LARGUERO MODIFICADO.....	59
5.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	62
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	72
7	BIBLIOGRAFÍA.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Accidente entre dos vehículos con colisión frontal [1] .....	9
Figura 2. Imagen de un tanque y una lata de sardinas .....	10
Figura 3. Distribución porcentual del parque automóvil. España, 2015 [4] .....	14
Figura 4. Pirámide de proporcionalidad para los diferentes grados de lesiones [5] .....	15
Figura 5. Evolución número de fallecidos por accidente de vehículo, 1960-2016 [6] .....	16
Figura 6. Primer vehículo a motor destinado al consumo .....	20
Figura 7. Primeros parachoques unidos a los extremos del bastidor .....	21
Figura 8. Parachoques robustos, décadas 30-60 .....	21
Figura 9. Primeros parachoques de plástico europeos .....	22
Figura 10. Primeros parachoques de plástico con anclajes internos .....	22
Figura 11. Elementos del paragolpes actual de un Audi A3 .....	23
Figura 12. Materiales y elementos que componen la estructura del parachoques [10] .....	23
Figura 13. 1) Punteras 2) Larguero 3) Viga transversal [11] .....	24
Figura 14. Recorrido de las fuerzas por la estructura del parachoques debido a un impacto frontal [10] y [12] .....	25
Figura 15. Límites elásticos para los elementos de la estructura del parachoques [10] y [12] .....	26
Figura 16. Vehículos sobre los que aplica la norma UN94: a) Turismo b) Furgón c) Picks Up .....	28
Figura 17. Representación esquemática de un ensayo bajo la norma UN94 .....	30
Figura 18. Partes sensoriales de un maniquí utilizado en pruebas de impacto .....	31
Figura 19. Acelerómetro colocado en pilar de la puerta de un vehículo .....	32
Figura 20. Pliegues en lateral del larguero, dos hacia afuera y uno hacia dentro .....	34
Figura 21. Pliegue En parte superior, curvatura hacia dentro .....	34
Figura 22. Diseño larguero original con pliegues y bordes redondos (previo a las simplificaciones), Catia ....	35
Figura 23. Portada Software CAD, Catia [15] .....	36
Figura 24. Operaciones utilizadas para modelizar el larguero original, Catia .....	37
Figura 25. Larguero original sin pliegues ni bordes redondos (simplificado) con operaciones de modelizado, Catia .....	38
Figura 26. Plano larguero original simplificado, Catia .....	39
Figura 27. Portada software de CAE, Abaqus .....	39
Figura 28. Conjunto largueros-traviesa analizado en CAE, Abaqus .....	41
Figura 29. Módulo Assembly de Abaqus .....	45
Figura 30. Larguero original con zona de carga de impacto y zona de empotramiento .....	47
Figura 31. Partición del larguero original .....	48
Figura 32. Mallado a tamaño 4 mm del larguero original .....	49
Figura 33. Análisis de sensibilidad de la malla con desplazamiento en magnitud .....	52
Figura 34. Análisis de sensibilidad de la malla con reacciones .....	53
Figura 35. Nodo seleccionado para el análisis de los desplazamientos, sección frontal .....	54
Figura 36. Reacciones en empotramiento de larguero original en función del tiempo .....	54
Figura 37. Gráfica de las reacciones para ensayos a distintas velocidades .....	55
Figura 38. Desplazamientos horizontales a diferentes velocidades de impacto para el larguero original .....	56
Figura 39. Desplazamientos verticales a diferentes velocidades de impacto para el larguero original .....	57
Figura 40. Desplazamientos del larguero original para ensayos a distintas velocidades .....	59

Figura 41. Larguero modificado diseñado con software CAD, Catia .....	60
Figura 42. Plano larguero original modificado .....	61
Figura 43. Desplazamientos horizontales a diferentes velocidades de impacto para el larguero modificado	62
Figura 44. Desplazamientos verticales a diferentes velocidades de impacto para el larguero modificado.....	63
Figura 45.Desplazamientos del larguero modificado para ensayos a distintas velocidades .....	65
Figura 46. Desplazamiento en Magnitud.....	66
Figura 47. Desplazamiento Vertical.....	66
Figura 48. Desplazamiento Horizontal .....	67
Figura 49. Desplazamiento Longitudinal .....	67
Figura 50. Reacciones en empotramiento en función del tiempo .....	69
Figura 51. Reacciones en empotramiento en ensayos a distintas velocidades.....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Evolución del parque automovilístico en los últimos 10 años España, 2006-2015 [4]	13
Tabla 2. Propiedades elásticas del aluminio [18]	43
Tabla 3. Propiedades elásticas del acero al boro [19]	44
Tabla 4. Parámetros Johnson-Cook para el acero al boro [20]	44
Tabla 5. Mallas utilizadas en análisis de sensibilidad	51
Tabla 6. Valores de los desplazamientos del larguero original	58
Tabla 7. Valores de los desplazamientos del larguero modificado	64
Tabla 8. Porcentajes de disminución en las reacciones entre el modelo original y el modelo modificado	71



## 1 INTRODUCCIÓN

Hoy, en pleno siglo XXI, el número de vehículos tiene un considerable peso sobre la dinámica de las ciudades y los trayectos a larga distancia entre particulares. Por otro lado, dichos vehículos se han vuelto cada vez más veloces y, por todo ello, ha aumentado la probabilidad de poder tener un accidente contra otro vehículo u objeto de la vía.

Durante la pasada década, organismos gubernamentales tomaron conciencia de este problema y comenzaron a controlar mediante normas y leyes la fabricación de estos vehículos, de forma que fueran más seguros. Empezaron siendo pocos países los que se sumaron a esta propuesta, pero con los años ha ido creciendo gradualmente en función de los resultados obtenidos en cuanto al número de víctimas producidas por este tipo de accidentes.

Ante esta iniciativa, las marcas automovilísticas no tuvieron más remedio que actualizar sus productos acorde a las normas de los gobiernos en los que residían. Una vez fabricados estos vehículos debían someterse a una serie de ensayos con el objetivo de adquirir el sello de aprobación y poder comercializarse.

Así, comenzó una nueva era de la automoción en la que se dejaba atrás la competición de vehículos potentes y estéticos y se apostaba por modelos más seguros.

En cuanto al tipo de accidentes, la mayoría de las colisiones son producidas por el frente (Figura 1) y la parte trasera del vehículo, por este motivo son éstas zonas de las que más se han preocupado en reforzar. Al inicio eran estructuras simples y que deformaban de forma no propicia para la seguridad del ocupante del vehículo. Con el tiempo se han ido añadiendo elementos con geometrías y materiales que han generado una gran mejora ante accidentes, además de elementos como los cinturones de seguridad y los airbags, para proporcionar mayor seguridad y evitar que los pasajeros se golpeen con las partes duras del habitáculo.



Figura 1. Accidente entre dos vehículos con colisión frontal [1]

Uno de los elementos más importantes en la estructura frontal o parachoques delantero, son los largueros, que resisten la mayor parte del impacto. Deben poder reaccionar ante varias situaciones de riesgo, ya que las colisiones raramente se producirán con una trayectoria totalmente perpendicular al vehículo o con un área de impacto 100% al mismo.

La importancia de este elemento es tal, que las empresas realizan cuantiosos estudios en base a ello. Buscan dar mayor rendimiento en la seguridad reduciendo a la vez peso y coste en el material. Para ello utilizan equipos de cualificados ingenieros que mediante software de diseño y análisis modelizan estructuras con grandes prestaciones. Todo esto siempre acorde a las leyes vigentes del país en el que se comercialicen buscando aumentar la seguridad tanto de los ocupantes del vehículo como de los transeúntes del entorno por el que se circula.

[2] En un accidente de colisión frontal el vehículo lleva bastante energía cinética. En el golpe, esta energía desaparece rápidamente, en cuestión de milésimas de segundo, por lo que la desaceleración es muy grande. Una aceleración, tanto positiva como negativa se traduce en una fuerza. Aquí es donde reside el problema, pues toda esta fuerza se transmite al vehículo y a los ocupantes que haya en el habitáculo.

Si el vehículo es excesivamente rígido (Figura 2) la desaceleración es demasiado grande por lo que los ocupantes se verán oprimidos por el cinturón y movidos por fuertes sacudidas. Como consecuencia estos sufrirán lesiones graves en pecho, órganos internos, cuello y cabeza (incluyendo el cerebro).

Por otro lado, si el coche es de chapa delgada (Figura 2), es decir, que se va a deformar mucho, la estructura puede llegar hasta el habitáculo y producir lesiones muy graves a los ocupantes de la parte delantera. Estos quedarán aplastados entre el amasijo de acero pudiendo producir amputaciones en partes del cuerpo y otras lesiones de gran importancia vital.



Figura 2. Imagen de un tanque y una lata de sardinas

Como conclusión y bajo muchos estudios, se llegó a la resolución de fabricar los vehículos con una parte frontal que se deformase hasta poco antes del límite con el habitáculo para absorber la energía cinética. A continuación, la carrocería que rodea el habitáculo donde se encuentran

los ocupantes debía ser dura y rígida para mantener la seguridad de los mismos.

Uno de los elementos más importantes en la estructura frontal o parachoques delantero, son los largueros, que resisten la mayor parte del impacto. Deben poder reaccionar ante varias situaciones de riesgo, ya que las colisiones raramente se producirán con una trayectoria totalmente perpendicular al frontal del vehículo, o con un área de impacto del 100% del mismo.

Dichos largueros también reciben el nombre de "acordeones", debido a que en el momento de la colisión estos elementos deben deformarse con esta forma para que la aceleración de deformación sea progresiva y se produzca de manera controlada. Para ayudar a esa progresión, el extremo de la parte frontal comienza con una sección más reducida que el extremo que va unido a la travesía del habitáculo. La sección menor, al soportar mayores esfuerzos se deforma más rápidamente que la opuesta, consiguiendo así que la desaceleración del vehículo sea lo más óptima posible. De este modo se consigue obtener un vehículo ni demasiado rígido, evitando que se produzcan fuertes sacudidas, ni excesivamente flexible (tipo "lata de sardinas") para impedir que aplaste a los pasajeros del habitáculo.

La importancia de este elemento es tal, que las empresas realizan cuantiosos estudios en base a ello. Buscan dar mayor rendimiento en la seguridad reduciendo a la vez peso y coste en el material. Para ello utilizan equipos de cualificados ingenieros que mediante software de diseño y análisis modelizan estructuras con grandes prestaciones. Todo esto siempre acorde a las leyes vigentes del país en el que se comercialicen, buscando aumentar la seguridad tanto de los ocupantes del vehículo como de los transeúntes del entorno por el que se circula.

Este proyecto se centrará en el diseño de los largueros de la parte frontal, que son los que soportan las mayores cargas. Dichos largueros tienen la dirección del movimiento del vehículo y forman parte de la carrocería por lo que se consideran empotrados a la bancada. Además, tienen unidos a ellos otros elementos como las travesías que ayudan a absorber los esfuerzos.

## 1.1 SEGURIDAD VIAL

La seguridad vial tiene como fin la prevención de accidentes de tráfico tanto de peatones, como de conductores. La acometida se está realizando mediante la instauración de leyes, reglamentos y disposiciones, además de elementos mecánicos que reduzcan el número de accidentes viales o los efectos que éstos producen.

Se pueden distinguir dos tipos de seguridad vial [3]:

- Seguridad vial activa: aplica a todos los medios necesarios para prevenir el accidente. Algunos de estos medios son las señales de tránsito, frenos ABS y la concienciación de los transeúntes viales.
- Seguridad vial pasiva: abarca los dispositivos que reducen la gravedad de las lesiones producidas a las víctimas de un accidente. El cinturón o los elementos de absorción de golpes son algunos de estos dispositivos.

El organismo español que se encarga de implementar todas estas medidas es la Dirección General de Tráfico (DGT), creado en el año 1959 y dependiente del Ministerio del Interior del Gobierno de España. En los últimos años, este organismo ha adquirido más relevancia debido al aumento de vehículos, y con ello, el número de accidentes. Algunas de las medidas más trascendentales promulgadas por la DGT han sido la incorporación de numerosos radares o el carnet por puntos.

Sin embargo, las medidas que se han tomado no son suficientes sin la concienciación de la sociedad. Es por ello, que a través de campañas de concienciación como la impulsada junto al grupo de comunicación Atresmedia denominada “Ponle Freno”, se están produciendo cambios en la mentalidad de las personas sobre la seguridad vial.

Desde la instauración de todas estas medidas se ha observado un gran impacto en el mundo de la automoción. Diferentes organismos y entidades se encargan de registrar mediante estadísticas determinados indicadores que muestran cómo afectan estos cambios. Algunos de estos indicadores son: accidentes y víctimas por meses, días y horas, víctimas y vehículos implicados, circunstancias concurrentes, conductores implicados y tablas generales.

### 1.1.1 ESTADISTICA EN LA SINIESTRALIDAD

En los comienzos de la carrera automovilística, la única preocupación eran las mejoras en las capacidades de los vehículos. Sin embargo, según fue aumentando el número de éstos, el porcentaje de accidentes por colisión u otras circunstancias también creció. De este modo, las necesidades en otros ámbitos como la seguridad o la contaminación aumentaron adquiriendo un toque de importancia.

Para determinar cómo habían influenciado las medidas llevadas a cabo por los organismos competentes de la seguridad vial, éstos y otras entidades procedieron a registrar numerosos datos en estadísticas. Estas tablas comenzaron a realizarse por la década de los sesenta dejando reflejados datos hasta la actualidad. De esta forma, si el porcentaje de accidentes aumenta o disminuye tras haber tomado una medida importante se valora si se deben retirar o implementar más de la misma índole.

Como se ha mencionado, el parque de automóviles ha crecido enormemente desde sus inicios. Sin embargo, puesto que la mayoría de las normas y leyes se han implementado en la última década, es aquí donde se hará mayor hincapié a esta variación. La Tabla 1, muestra la tabla de datos sobre la cuantía de vehículos en este último periodo:

Parque	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2015/2014	Variación Interanual 2006-2015
Camiones y furgonetas	4.910.257	5.140.586	5.192.219	5.136.214	5.103.980	5.060.791	4.984.722	4.887.352	4.839.484	4.851.518	0%	0%
Autobuses	60.385	61.039	62.196	62.663	62.445	62.358	61.127	59.892	59.799	60.252	1%	0%
Turismos	21.052.559	21.760.174	22.145.364	21.983.485	22.147.455	22.277.244	22.247.528	22.024.538	22.029.512	22.355.549	1%	1%
Motocicletas	2.058.022	2.311.346	2.500.819	2.606.674	2.707.482	2.798.043	2.852.297	2.891.204	2.972.165	3.079.463	4%	5%
Ciclomotores	2.343.124	2.430.414	2.410.685	2.352.205	2.290.207	2.229.418	2.169.668	2.107.116	2.061.044	2.023.211	-2%	-2%
Tractores Industriales	204.094	212.697	213.366	206.730	199.486	195.960	186.964	182.822	186.060	195.657	5%	0%
Otros Vehículos <sup>1</sup>	388.597	427.756	436.631	447.363	450.514	459.117	460.196	463.181	475.872	420.734	-12%	1%
<b>Total</b>	<b>31.017.038</b>	<b>32.344.012</b>	<b>32.961.280</b>	<b>32.795.334</b>	<b>32.961.569</b>	<b>33.082.931</b>	<b>32.962.502</b>	<b>32.616.105</b>	<b>32.623.936</b>	<b>32.986.384</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>

<sup>1</sup> La categoría otros vehículos incluye los vehículos especiales como son las barredoras, quitanieves, gruas, maquinaria de obras, etc. Se han excluido los remolques y semirremolques.

**Tabla 1. Evolución del parque automovilístico en los últimos 10 años España, 2006-2015 [4]**

La Tabla 1 proporciona un valor medio de unos 32 millones de vehículos de todo tipo. Sin embargo se debe prestar más atención a los camiones y furgonetas, turismos y motocicletas, pues son éstos los que mayor índice de siniestralidad en accidentes tienen. Es por ello que vemos como los turismos aumentan en este periodo ligeramente en un 1%, llegando al número de 22.355.549. Por otro lado, las motocicletas es el tipo de vehículo que más ha aumentado llegando al número de los 3 millones en el año 2015, un millón más que en el año 2006, es decir, un aumento del 5%. Puede que no sea un número tan elevado en comparación con los turismos, pero para la DGT y estudios de sociabilidad tienen gran representación. Este aumento es debido, entre otros motivos, al comienzo de la crisis económica en el año 2008, ya que las motocicletas son vehículos más económicos y con mayor facilidad de aparcamiento, por lo que supusieron una ayuda para solventar parte del problema financiero en muchas familias españolas. Esto produjo que muchos

conductores no experimentados con este tipo de vehículos adquiriesen uno y el aumento de accidentes creciese. Por este motivo, la DGT ha necesitado tomar nuevas medidas de seguridad a aplicar, como son elementos específicos de seguridad en las vías y normas que seguir.

Usando los datos más recientes registrados, del año 2015, se puede realizar una estadística con los porcentajes que representa cada tipo de vehículo en el parque automovilístico. La Figura 3 muestra un resumen de estas proporciones respecto al total:

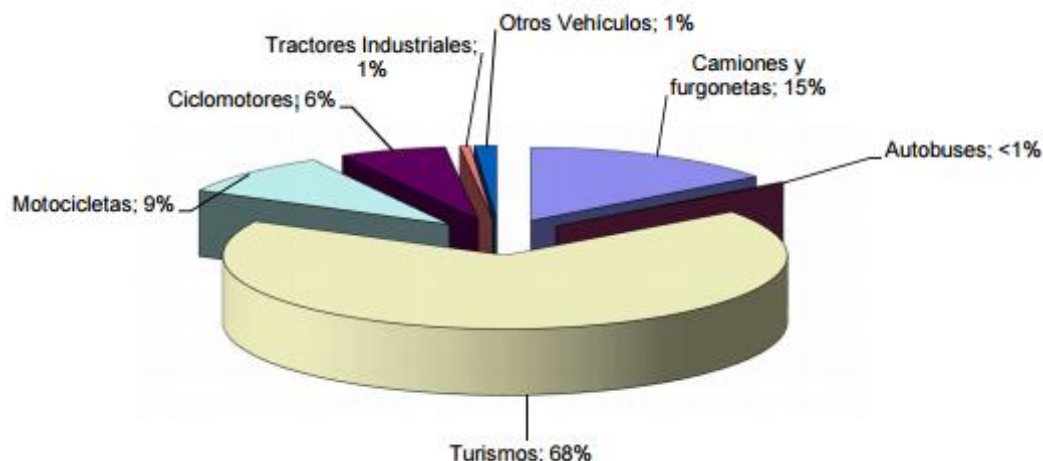


Figura 3. Distribución porcentual del parque automóvil. España, 2015 [4]

En esta distribución porcentual se ve como el mayor porcentaje se lo llevan los turismos con una representación del 68% de los 32 millones de vehículos que abarca el total. Seguido de esta cifra están los camiones y furgonetas con un 15%, ya que están destinadas al transporte de mercancía. A continuación las motocicletas alcanzan un número bastante simbólico del 9% respecto al total. Por último, los menores porcentajes se lo llevan los vehículos menos utilitarios o con un uso específico como son los ciclomotores, los tractores industriales, los autobuses y otros vehículos (barredores, quitanieves, grúas, máquinas de obras, etc).

Volviendo al tema de los accidentes, todas las normas que se han ido instaurando en las últimas décadas esperan ir reduciendo todo tipo de accidentes. Muchos de ellos terminan con el fallecimiento de las víctimas, pero otros muchos son lesiones de menor gravedad. Estas también traen repercusiones indirectas al existir un elevado número. Cuando ocurre un incidente deben acudir servicios de emergencia que, a pesar de pertenecer al estado, son recursos que se podrían utilizar en otros casos. Además, el material sanitario que se necesita para cualquier emergencia no es precisamente económico. Por ello, el coste en la sanidad repercute de forma que no se puedan utilizar más recursos en otras instituciones como la educación o no poder atender debidamente los accidentes de mayor importancia. Por tanto, intentar prevenir los accidentes es a lo que más se presta atención en cuanto a

seguridad vial.

A continuación, se observa una pirámide donde se aproximan las cantidades entre los fallecidos y los heridos de gravedad en accidentes de tráfico (ver Figura 4):



Figura 4. Pirámide de proporcionalidad para los diferentes grados de lesiones [5]

En la cúspide de la pirámide se encuentra, encabezando la cadena de gravedad de lesiones, 1 fallecido. Por debajo de ella, aparece una cifra de 45 lesiones con hospitalización, algo mayor que la anterior pero nada comparado con el número de lesiones atendidas por los servicios de urgencias. Estas últimas lesiones llegan al número de 1500 en tanto por 1 de víctimas fallecidas. Suelen suceder a bajas velocidades, es decir, en poblado. La mayoría de las causas suelen ser por despistes o el incumplimiento de algunas normas de circulación, por lo que la solución debe ser concienciar a los conductores y transeúntes de la vía. A pesar de no ser lesiones de importancia, afectan considerablemente en los aspectos económicos anteriormente mencionados, y debido a su gran repercusión se intenta disminuir su número de la mayor manera posible.

Dejando a un lado el tema económico, los accidentes con víctimas mortales son la mayor prioridad. Los recursos se pueden volver a ganar, las lesiones al final se curan o se pueden sobrellevar, pero la vida de las personas es un bien que no se puede recuperar y que afecta a los seres queridos de las víctimas. Ya que es un asunto al que prestar especial atención, las medidas más señaladas de la DGT están más orientadas a este tipo de sucesos. Un ejemplo son los radares para reducir la velocidad en algunos tramos que la vía presenta dificultades. Por otro lado, se debería mejorar el estado de las carreteras ya que también son una de las causas de numerosos accidentes. Desde su creación en el año 1959, la DGT recopila diversos datos que sirven como indicadores y permiten elaborar estadísticas, gráficas y tablas de frecuencias que verifican que las medidas tomadas salvaguardan la vida en las carreteras. La gráfica que más relevancia tiene como indicador se trata de las víctimas mortales por año. La Figura 5 muestra el número de fallecidos en



vías interurbanas en el intervalo de tiempo comprendido entre el año 1960 y 2016:

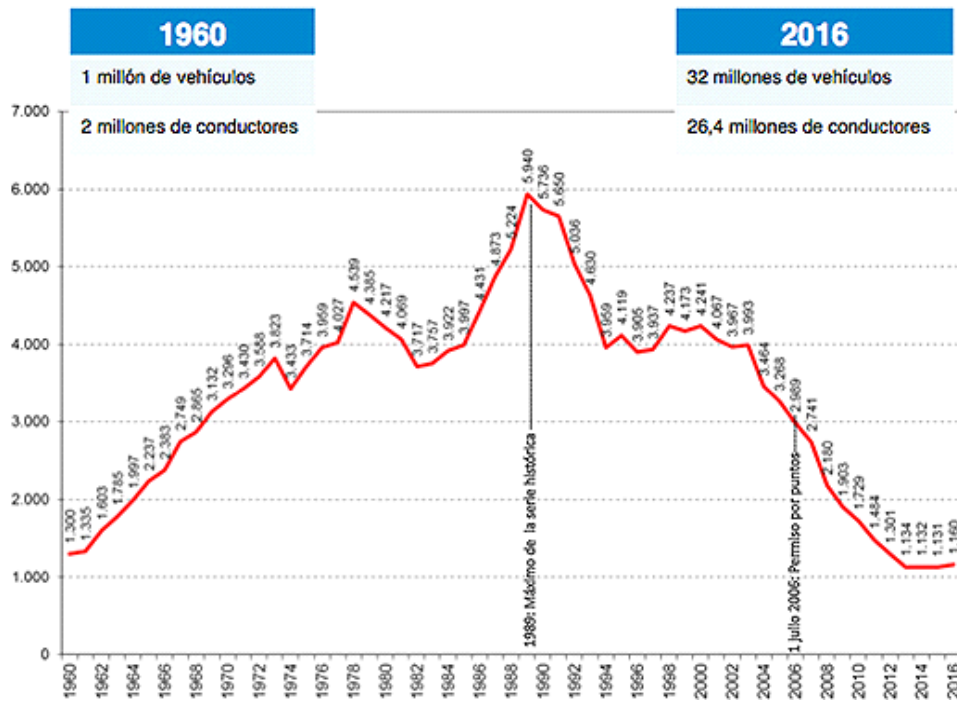


Figura 5. Evolución número de fallecidos por accidente de vehículo, 1960-2016 [6]

En la parte superior de la gráfica se observa como en el año 1960 el número de conductores era de 2 millones frente a los 26,4 millones que existen en el último año registrado (año 2016). Al comienzo de este crecimiento, se empezaron a recoger las cifras de accidente de tráfico con víctimas mortales. En este primer año, el número total de fallecidos fue de 1.300. Estas cifras comenzaron con un ascenso hasta el año 1989, momento en el que se registró el mayor pico de fallecimientos por accidentes con vehículos de la historia, 6.040. Fue entonces a principios de los años 90 cuando salieron a la luz los catastróficos resultados de pruebas de choque realizadas en diversos modelos de vehículos. Estas pruebas fueron llevadas a cabo por un organismo privado, la NCAP [7]. A partir de ahí las marcas de coches comenzaron a rediseñar la fabricación de sus modelos a unos más seguros. Desde entonces ese número comenzó a disminuir paulatinamente hasta registrar un mínimo de 1.134 fallecidos en el año 2013. Hasta la actualidad este valor se ha mantenido estable con un ligero aumento en el último año. De los últimos datos registrados, en el año 2015 fueron 1.131 los fallecidos, es decir, 1 fallecido más que en 2014. Sin embargo, del año 2015 al 2016 si se puede apreciar un importante crecimiento dejando constancia de 1.160 muertes sufridos por vehículos.

Otro dato señalado en la gráfica es el permiso de conducir por puntos. En el año 2006 se hizo vigente, sin embargo no se apreció un descenso mucho mayor con respecto a años previos.



Con estos datos, en los últimos años se ha mantenido en carretera un promedio diario de víctimas mortales, que ha pasado de los 11,6 muertos diarios en carretera en el año 2000 a los 3,2 fallecidos diarios en 2016.

### 1.1.2 NORMATIVA DE HOMOLOGACION DE IMPACTOS

El avance en la automoción produjo un crecimiento en los siniestros de vehículos. En el año 1989 un organismo independiente, la NCAP, que había estado realizando pruebas de choque sobre diferentes modelos de coche publicó sus resultados [8]. Estos habían reflejado la gran inseguridad que los ocupantes del vehículo sufrían en caso de accidente. Por ello, se generó la necesidad por parte de la Unión Europea (UE) y algunos países externos (Japón, Australia, Malasia, Sudáfrica, Egipto por citar algunos ejemplos) de establecer unas normativas y reglamentos viales para reducir todos estos accidentes de tránsito. Así, se designaron ciertas pruebas de choque simulando accidentes reales para evaluar los daños repercutidos en cada modelo de vehículo. Dicho conjunto de normas se conocen como UN (antes normas UNECE \*). Dentro de dichos requisitos se encuentran dos normas de especial importancia, la norma UN94 y UN95, pruebas de impacto (choque) frontal y lateral respectivamente. En ellas se evalúa más la efectividad de la estructura deformable que los elementos auxiliares de seguridad (airbags, frenos ABS, apoya cabezas, etc).

Estas normas, la gran ventaja que tienen es su estandarización. Al estar certificadas y controladas por los gobiernos que participan en ellas, todas las empresas de este sector están obligadas a pasar las pruebas con las mismas especificaciones.

Puesto que este proyecto estudiará un elemento relacionado con los golpes frontales, más adelante se desarrollará la norma UN94 de forma más exhaustiva.

## 1.2 OBJETIVOS

En la actualidad, el sector automovilístico le da mayor prioridad a la seguridad de sus vehículos. Las estadísticas de siniestralidad registran que la parte de un vehículo que más colisiones sufre es la parte frontal.

La estructura de la parte frontal que absorbe los impactos es el parachoques delantero, que está formado por varios elementos. Sin embargo, estudiar todos ellos involucraría un excesivo coste computacional, por lo que este proyecto se centrará en el que más influye para la absorción de la energía de impacto, los largueros.

Por todo lo anterior, el **objetivo principal** perseguido en este proyecto es analizar el comportamiento del larguero frente a impacto y realizar un modelo mejorado del mismo. Para alcanzar dicho objetivo principal, es necesario abordar los siguientes objetivos secundarios:

- Conocer la evolución histórica de la estructura del parachoques, para intentar prever o tener una visión de cómo podrían ser los sucesivos prototipos de la pieza.
- De la misma manera, informarse de todos los modelos que existen de largueros, así como sus propiedades más influyentes en relación con la absorción de la energía de impacto.
- Recopilar la información necesaria en la normativa por la que se rigen este tipo de choques frontales y anotar los datos necesarios.
- Escoger un modelo de coche concreto y determinar las medidas que definen la geometría del larguero a estudiar.
- Modelizar la pieza mediante un software de diseño asistido por computador (CAD).
- Realizar un modelo de elementos finitos del larguero, que permita simular las condiciones de impacto, analizando la respuesta del mismo.
- Realizar las modificaciones pertinentes en la pieza original y atendiendo a unos parámetros concretos, alcanzar una solución de mejora ante las necesidades buscadas. Por un lado, se requiere que la estructura del parachoques no se deforme en exceso (evitando que el motor entre en el habitáculo), ni que sea excesivamente rígida (las fuertes sacudidas debidas a las elevadas aceleraciones pueden llegar a afectar a los órganos internos de los ocupantes).

### 1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Todo proyecto debe estar bien organizado, por lo que es de especial necesidad marcarse unos puntos clave que indiquen unas pautas a seguir. Como cualquier problema de física, primero debemos conocer los datos y las herramientas de las que disponemos para poder encontrar la solución de la manera más óptima y analizar los resultados. De esta forma, este proyecto se ha estructurado de la siguiente forma:

En el capítulo 1 se realiza una breve introducción al tema analizado en el que se resalta la importancia del elemento a estudiar y se plantean los objetivos que contiene este proyecto.

En el capítulo 2 se expone una breve revisión bibliográfica de la evolución que han sufrido los parachoques delanteros. También se hablará de otro dato importante para el desarrollo de este proyecto, el material del que se fabrica el elemento a estudiar, el larguero. Además, se indicarán distintas formas de arreglar el elemento en caso de deterioro por colisión.

El capítulo 3 anuncia algunos aspectos de la norma UN94 que habla sobre los choques

frontales. De ella se obtendrán los datos necesarios para el futuro análisis del larguero.

El capítulo 4 está relacionado con la parte del desarrollo del modelo del larguero. Primero se diseña el modelo mediante un software haciendo uso de unas cotas tomadas a partir del modelo real. Después, se implementa el modelo en un código de elementos finitos para ver la respuesta obtenida frente a un impacto frontal.

El quinto capítulo analiza los resultados del modelo original y busca una modificación que mejore los parámetros de especial importancia en comportamientos físicos. El nuevo modelo se somete a un análisis de elementos finitos y se compara los resultados con el modelo original.

En el último capítulo (Capítulo 6) se presentan las conclusiones obtenidas de los análisis y las comparaciones entre ambos modelos. Así, se señalan los factores que ofrecen mejores resultados y como podrían incluirse en futuros proyectos.

## 2 PARACHOQUES DELANTERO: EVOLUCIÓN Y CARACTERÍSTICAS

El parachoques delantero tiene la misión de absorber los impactos recibidos en sentido frente a él. Normalmente son a causa del impacto con otro vehículo o la colisión con un elemento externo a la vía.

Desde sus inicios, los coches se han visto sometidos a diversos cambios. Según se percibieron las necesidades requeridas por los usuarios de estos vehículos, se les realizaron modificaciones que afectaban tanto a la estética como a la estructura encargada de la seguridad de los ocupantes [9].

El primer vehículo que se consideró para la fabricación, llamado "motorwagen" (Figura 6), se trataba de un triciclo con motor de combustión de gasolina que apenas tenía protecciones ante impactos. En ese momento, el objetivo de la automoción se centraba en la mecánica y el diseño.



Figura 6. Primer vehículo a motor destinado al consumo

Más tarde, con la introducción de la fabricación en cadena, cuyo pionero fue Henry Ford, el coste de producción se redujo enormemente. Esto causó que un mayor porcentaje de la población pudiese permitirse tener un automóvil. En consecuencia, comenzaron a notificarse un gran número de accidentes que, a pesar de la poca velocidad que alcanzaban los vehículos, su gran peso producía consecuencias terribles en las colisiones.

Comenzando así la carrera a favor de la seguridad vial, entre los años 1920 y 1930 se implementó unos elementos de seguridad en la parte frontal y trasera del vehículo, el paragolpes. Su diseño inicial trataba de una composición de dos barras horizontales de acero que se unían al vehículo a través de los largueros (extremos del bastidor) y en otros casos a la carrocería (Figura 7). Con esta nueva mejora, se intentó reducir la gravedad del impacto de forma que tanto el vehículo como sus ocupantes sufrieran menos riesgos de lesiones.



**Figura 7. Primeros parachoques unidos a los extremos del bastidor**

Según pasó el tiempo, entre las décadas 30 y 60 se fue dando mayor importancia a la estética de los vehículos, fabricando así unos paragolpes más robustos y con formas complejas (Figura 8). Más adelante se fue reduciendo el tamaño de estos.



**Figura 8. Parachoques robustos, décadas 30-60**

Por otro lado, el paragolpes se unió directamente a la carrocería e incorporó unos tacos en el frontal para que en los accidentes a bajas velocidades, el coche no sufriera grandes daños.

Más tarde, a pesar de que el paragolpes seguía siendo de metal, se consiguió reducir su peso construyéndolo con formas más delgadas. La solución se logró realizándole unos pliegues que le daban mayor resistencia.

Los vehículos americanos también tuvieron que pasar unas normativas en las que debían superar una prueba de impacto contra una barrera perpendicular. Para superar esta prueba los elementos de seguridad, faros y sistema de combustible no podían verse afectados.

A finales de la década de los 70, comienzan a implementarse piezas de plástico como elementos de absorción de impactos. En algún caso, el paragolpes europeo, que antes era de acero se sustituye por uno entero de plástico (Figura 9).



Figura 9. Primeros parachoques de plástico europeos

A continuación y hasta finales de milenio, el paragolpes de plástico abarcaba toda la parte frontal y trasera, siendo atornillados a la carrocería debido a su peso. Además, se le reforzó la parte interna con una espuma para absorber con mayor suavidad los golpes moderados y evitar gran parte de la deformación en la carrocería.

La evolución de la industria permitió una mejora en los polímeros. A consecuencia, el peso del parachoques se redujo tanto que facilitó la unión a la carrocería mediante anclajes internos (Figura 10).



Figura 10. Primeros parachoques de plástico con anclajes internos

Finalmente, hoy en día los vehículos se han equipado con paragolpes de plástico cuya función predominante es de estética. Ahora los verdaderos elementos de absorción de golpes (absorbedor de impactos, traviesa, faldón, etc) se encuentran detrás de este.

A continuación, en la Figura 11 se observa el despiece de un paragolpes delantero de un Audi A3 (vehículo actual). En ella se muestran los elementos más representativos para la absorción de impactos:



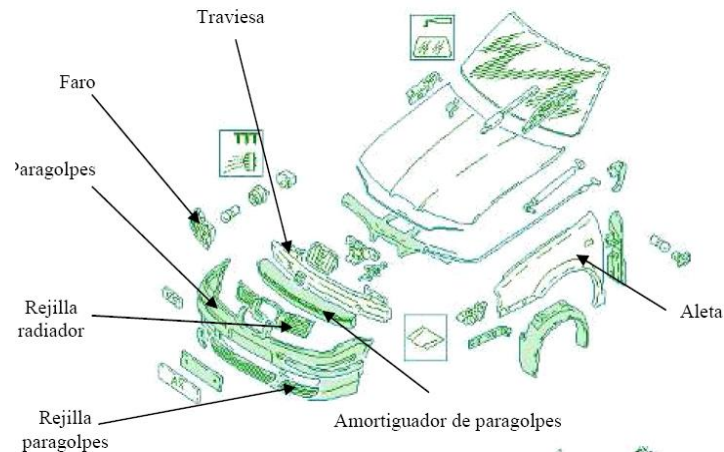


Figura 11. Elementos del paragolpes actual de un Audi A3

## 2.1 ESTRUCTURA

Como las colisiones no suelen chocar con el 100% de la parte frontal ni con un ángulo perpendicular a esta, los elementos de absorción de golpes que componen la estructura del parachoques deben tener geometrías, dimensiones y posiciones concretas para repartir los esfuerzos independientemente de la situación del accidente. Además, hay que tener en cuenta que el conjunto de la estructura del parachoques debe estar alojado entre el resto de elementos que se sitúan debajo del capó, y que en caso de colisión su prioridad máxima sea no desplazar el motor al interior del habitáculo.

Los elementos principales del parachoques delantero se muestran a continuación en la Figura 12:

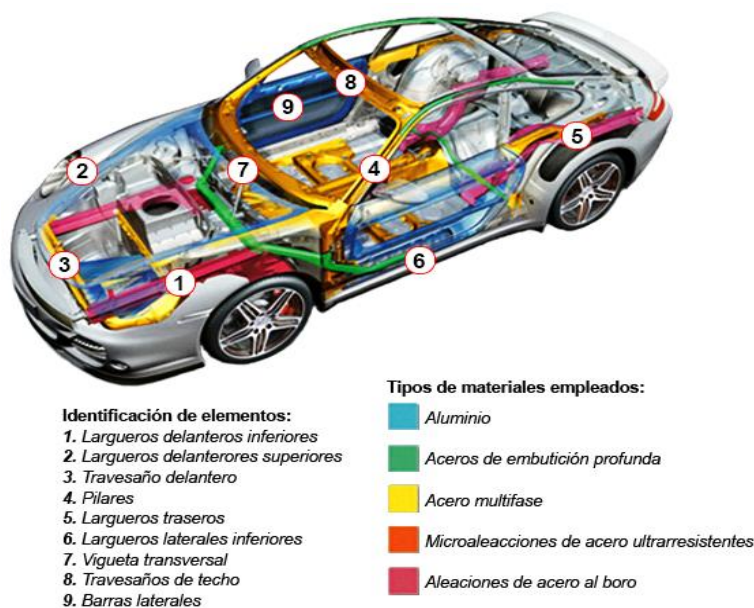


Figura 12. Materiales y elementos que componen la estructura del parachoques [10]

En la Figura 12 se observan dos largueros delanteros, el inferior (número 1) y el superior (número 2). El larguero inferior tiene una forma más longitudinal al vehículo para resistir la mayor parte de los esfuerzos ante los golpes frontales. Por el contrario, los largueros superiores tienen forma más curva para actuar cuando la trayectoria de la colisión tiene algo de inclinación respecto al frontal.

El análisis al que se verá sometido el modelo que se desarrollará más adelante tiene una aplicación de carga frontal. Por ello, este proyecto se ha centrado en los largueros inferiores.

Los largueros suele estar unidos por uno o dos travesaños (número 3 y 7), dependiendo del tipo de carrocería, que se encargan de distribuir la energía por la base del vehículo. El travesaño trasero se utilizará como condición de contorno de empotramiento y la traviesa delantera para la aplicación de las cargas a las que se someterán los largueros inferiores.

En los vehículos más modernos, entre el larguero y la traviesa, aparecen soldadas unas punteras de apenas 30cm de longitud. Este elemento, situado en el extremo del larguero, está diseñado de tal forma que para colisiones a velocidades reducidas (<20 km/h) sea el único que se deforme manteniendo intacta el resto de la estructura. Existe además, otro sistema formado por un conjunto bitubo con amortiguación hidráulica. A continuación se muestra una imagen con la posición que ocupan dichas punteras en el larguero (Figura 13).

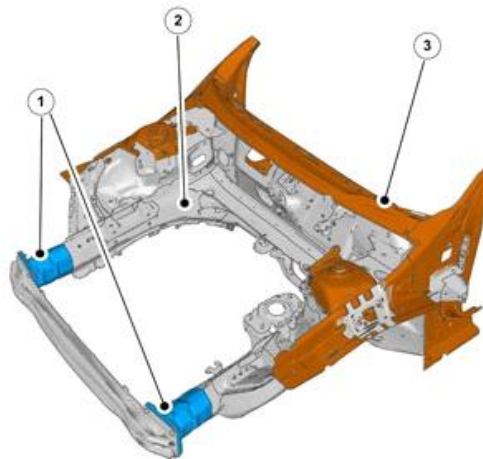


Figura 13. 1) Punteras 2) Larguero 3) Viga transversal [11]

Además, al inicio del larguero llevan unos pliegues o hendiduras hacia fuera y hacia dentro que ayudan a realizar la deformación programada.

Los refuerzos longitudinales en los largueros situados debajo de la puerta (número 6), reforzados con tabiques interiores, garantizan un sólido apoyo a las ruedas.

Por otro lado, en caso de colisión, la fuerza impactada contra el frontal recorre todos los elementos de la estructura que lo conforman. La distribución de la fuerza es importante



para producir una deformación progresiva y controlada. A continuación, en la Figura 14 se esquematiza el recorrido de la fuerza en caso de una colisión frontal:



Figura 14. Recorrido de las fuerzas por la estructura del parachoques debido a un impacto frontal [10] y [12]

En esta imagen se ve como el camino recorrido por la fuerza es el siguiente:

- Viga del parachoques con caja de impacto/Travesaño delantero
- Largueros delanteros
- Largueros delanteros superiores
- Vigas transversales, tablero intermedio/Travesaño intermedio
- Tubo transversal, cuadro de instrumentos
- Sub-bastidor (subframe)
- Montantes A - barras de puerta -largueros de caja, techo

## 2.2 MATERIALES

A lo largo de la historia de los parachoques, los materiales han ido evolucionando con el objetivo de conseguir piezas más resistentes y menos pesadas. Además, cada elemento de la estructura está fabricado de un material distinto en función de la cantidad de energía a absorber.

Del mismo modo, el material debe reunir unas propiedades concretas de deformación para asegurar que ningún elemento se incrusta en el habitáculo de pasajeros ni que al sufrir un choque la desaceleración sea tan repentina como dañina para los ocupantes. A este fenómeno se le llama deformación programada, es decir, absorber la energía cinética del choque en una secuencia concreta de piezas y con una velocidad de deformación específica.

Por tanto, si se observa de nuevo la Figura 12 y la figura XXX, que a continuación se adjunta, se puede ver como el material del que están hechos los largueros delanteros suele ser de

una aleación de acero al boro. Este tipo de acero se le considera como un acero de alta resistencia, pudiendo encontrar otros que soportan mayores esfuerzos, lo cual no es lo que se busca en esta pieza. Las propiedades de este material especifican un límite de elasticidad frente a deformación plástica en un intervalo comprendido entre los 180 y 280MPa. Sin embargo, estos datos son dados antes de conformar ni tratar superficialmente el material. Normalmente, tras estos procesos la dureza de la pieza final aumenta. En el caso del acero al boro, primero es calentado hasta una temperatura de 940°C y después enfriado hasta los +140°C realizando así un temple superficial que le aumenta considerablemente la dureza. Además, los largueros deberán tener buen comportamiento frente a altas temperaturas ya que al estar alojados cerca del motor recibirán bastante calor de este.

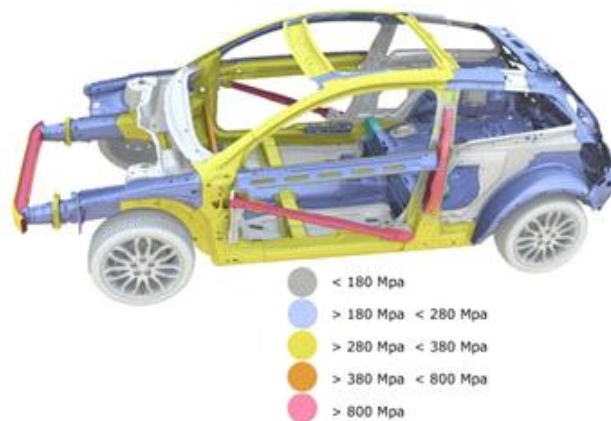


Figura 15. Límites elásticos para los elementos de la estructura del parachoques [10] y [12]

## 2.3 MANTENIMIENTO

Por el simple uso del vehículo, los largueros no tienden a deteriorarse. Sin embargo, cuando el vehículo sufre un impacto, algunos elementos como los largueros, se deforman plásticamente pero con posibilidad de arreglarlos.

Para impactos cuya velocidad no excede los 20 km/h, solo actúan las punteras unidas a los largueros en sus extremos. Las punteras están insertadas en los largueros mediante soldadura tipo MAG [11], esto facilita que en caso de cambiar la pieza no sea necesario colocar el vehículo en bancada. Para realizar el cambio por una pieza nueva, primero se corta la antigua puntera con una radial y se suelda con el mismo método la nueva.

En el caso de que el impacto se produzca a una velocidad superior a los 20 km/h, los largueros comienzan a deformarse plásticamente. En función de la deformación sufrida existen dos posibles soluciones para su arreglo:

-Primero se introduce el vehículo en bancada y se observa el grado de deformación que se ha producido en los largueros. Si el operario considera que no se han deformado excesivamente, se aplica calor para hacerlos más moldeables y se les unen unos rieles a los extremos del largueros para estirarlos y recolocarlos a su posición original. Esta posición se

cuadra mediante unos elementos medidores colocados en las diagonales de lo que sería el capó y elementos de referencia del vehículo. Atender que el operario no hace uso de una documentación con medidas estándar de deformación para cada vehículo. Con su experiencia y elementos de referencia que el mismo toma recoloca los largueros a su posición.

-Si la deformación ha sido tal que tras estirar el larguero no queda en su posición original o directamente no se puede estirar, se debe cambiar el larguero entero. Para ello, hay que vaciar de cualquier otro elemento mecánico que se encuentre rodeando a la estructura del parachoques. Además, hay que desmontar el salpicadero para retirar todos los sistemas eléctricos. A continuación, mediante una radial, se corta el larguero a la altura de la torreta de suspensión (punto al que llegan los largueros) y se suelda el salpicadero nuevo mediante soldadura tipo MAG. Es esta soldadura la que obliga a quitar los sistemas eléctricos con el fin de evitar un cortocircuito, y con ello, un incendio en el vehículo.

Esta última solución, debido al gran número de componentes que hay que desmontar, no se considera rentable económicamente. Por lo que en caso de sufrir una gran deformación que obligue a realizar la sustitución de todo el larguero, es mejor cambiar de vehículo.

### 3 NORMATIVA VIGENTE: NORMA UN94 [13]

Todo vehículo debe pasar una serie de ensayos que verifiquen que salvaguarda la seguridad de sus ocupantes. Estos ensayos son vigilados por el gobierno en el que se comercializa el vehículo de modo que debe llevar una serie de normativas. Existen diversos tipos de ensayo en función de la colisión producida: choque frontal, choque trasero y choque lateral.

Cada uno de estos ensayos es legislado por una norma. Dentro de cada una de ellas se introducen diferentes situaciones de riesgo para ser analizadas. En el caso de la colisión frontal, se realizan ensayos de choque con la totalidad o la parcialidad del frontal, choque contra otro vehículo de diferentes alturas, u otros ensayos similares con choque frontal.

En este apartado se hablará de todos los aspectos técnicos que recoge la norma UN94 para poder homologar un vehículo frente a choques frontales. Incluye desde el ámbito de aplicación, definiciones, especificaciones de los ensayos, criterios de medición de lesiones, hasta aspectos administrativos de la homologación, instrucciones para el uso de vehículos equipados con airbags e información de contacto acerca de los laboratorios responsables de realizar los ensayos de homologación y servicios administrativos.

#### 3.1 ÁMBITO DE APLICACIÓN

Las normas están dirigidas a aquello que está obligado a seguirlas, ya sean personas o vehículos, este último es el caso de la norma UN94. Por otro lado, existen diferentes tipos de vehículos en función del tamaño, peso, número de plazas, número de ruedas y más factores.

Los vehículos para los que está dirigida la norma UN94 son los de categoría M1. [14] La masa total admisible para esta categoría no debe superar los 2500 kg y el número máximo de plazas sentadas es de ocho, incluyendo la del conductor. Si el fabricante lo desea, puede solicitar integrar un utilitario tipo furgón o picks up en esta norma.

En la siguiente Figura 16 se puede ver diferentes tipos de vehículos de categoría M1 para los que está dirigida la norma UN94:



Figura 16. Vehículos sobre los que aplica la norma UN94: a) Turismo b) Furgón c) Picks Up

### 3.2 HOMOLOGACIÓN

La homologación de un producto consiste en hacerle pasar por una serie de pruebas que, si se superan, certifican su estandarización y el ajuste a una serie de normas. Así, todos los vehículos del mismo modelo reúnen las mismas características.

De este modo, la norma UN94 proporciona las directrices relativas a la homologación, pasos a seguir en la modificación de productos ya homologados, cese de producción y la confección de las marcas de homologación.

Si el ensayo no supera las especificaciones correspondientes de la norma UN94, esta tiene definidas las sanciones a aplicar en cada caso, además de la retirada de la homologación.

### 3.3 ENSAYO

Para realizar un ensayo correctamente se establecen unos parámetros que estandarizan la prueba. De esta manera, el ensayo puede realizarse en cualquier parte siempre que sea controlado por la competencia gubernamental correspondiente.

En el caso de los ensayos en vehículos sometidos a impacto frontal, estos tienen dos formas de ser propulsados para simular el accidente. Por un lado, puede ser autopropulsado con su propio motor yendo dirigido por unas guías para tener gran precisión en su trayectoria, o mediante unos rieles es trasladado a gran velocidad hasta la zona de impacto.

La gravedad del accidente se estima en dos formas, en la deformación que se ha generado en el vehículo, y las lesiones que esta deformación y lo que ello acarrea ha producido en los ocupantes del mismo. La forma de medir las consecuencias en un ensayo de este tipo se consigue mediante varios elementos situados en el vehículo. Las bandas de aceleración junto con un análisis de la estructura deformada estudian el comportamiento que ha sufrido la misma durante el ensayo de impacto. Por otro lado, se introduce en el interior del habitáculo unos maniqués de altas prestaciones que cuantifican la magnitud de las lesiones producidas.

Para representar las condiciones externas se precisa de un terreno uniforme y horizontal. Además, la barrera contra la que se desea impactar debe ser perpendicular a la trayectoria del vehículo, de un material que ofrezca un peso y una deformación específica, unida al suelo con un empotramiento fijo. Como se ve en la Figura 17 las dimensiones de esta deben tener una longitud de 1000mm y una anchura de 540mm.

Aunque la norma UN94 realiza el ensayo de diferentes formas, para este proyecto se ha escogido una en la que el vehículo debe colisionar en un 40% de su parte frontal. En la vida real los accidentes ocurren con diversas irregularidades por eso este ensayo simula con mayor exactitud una situación cotidiana y con mayor riesgo. Además, si se vuelve a observar la Figura 17, la parte a chocar debe ser la del conductor ya que es en este lado donde reside la columna de dirección y puede causar mayores lesiones.

La velocidad es un dato muy influyente a la hora de producir las repercusiones del ensayo. La norma UN94 estipula una velocidad de 56km/h o de manera equivalente, 35MPH. Si la velocidad fuera menor no estaría acorde con una situación que refleje el realismo de un accidente en vía urbana, y si fuera mayor ningún vehículo pasaría las pruebas ya que los materiales y estructuras tienen un límite. Además, como la velocidad media de un vehículo suele rondar por esta magnitud, la homologación del mismo debe hacerse utilizando este parámetro.

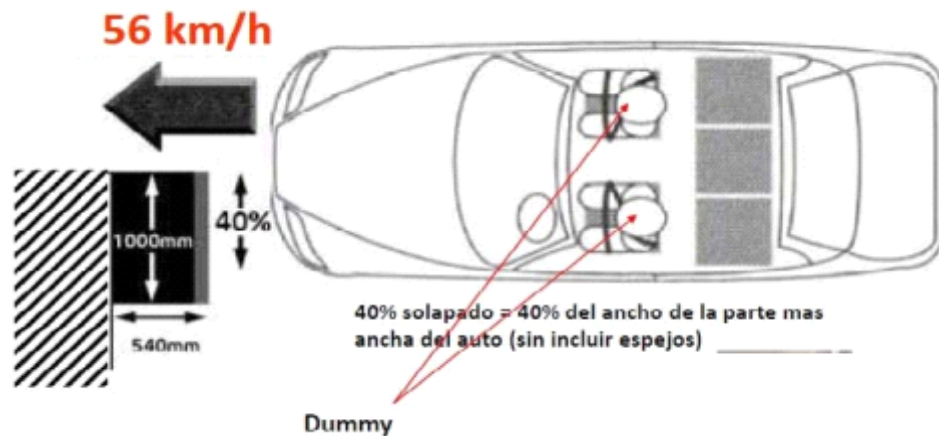
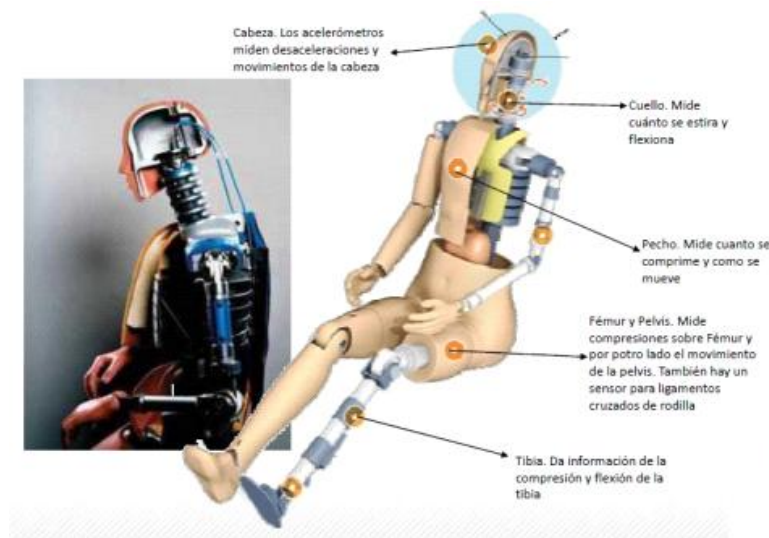


Figura 17. Representación esquemática de un ensayo bajo la norma UN94

Los dispositivos del vehículo que no influyan en los resultados medidos sobre la colisión pueden ser omitidos. Sin embargo, como el peso total del vehículo si afecta en la prueba, estos elementos auxiliares deberán ser sustituidos por masas equivalentes y en sus correspondientes posiciones. Por otro lado, los elementos móviles como las ventanillas deberán ir cerradas en el momento del choque pero sin el bloqueo, al igual que las puertas.

Los maniqués (dummies) que se utilizan para reemplazar a las personas que ocuparían el habitáculo en caso de accidente, también están normalizados bajo la UN94. La posición de los dummies en que deben ir colocados en el habitáculo también está notificada para la prueba. El ensayo se hará con diferentes tipos de maniqués para representar las lesiones en diferentes tipos de personas. Además, los maniqués de niños deben posicionarse en lugares concretos puesto que el asiento del piloto y el copiloto tienen un uso restringido. Los dummies son de especial importancia ya que en ellos se tomarán algunas de las medidas que cuantificarán la gravedad de las lesiones sufridas durante la colisión. Las partes del cuerpo donde se toman estas medidas son: la cabeza, el cuello, el tórax, el fémur y la tibia. En la Figura 18 se puede ver la imagen de un maniquí con las partes señalizadas donde se estudia el comportamiento ante un accidente de coche.



**Figura 18. Partes sensoriales de un maniquí utilizado en pruebas de impacto**

Observando con mayor detenimiento la imagen del maniquí, se puede ver un poco como está hecho. Por otro lado, además de estar señalizada algunas partes del cuerpo también están descritos los parámetros que se mide en cada una de ellas. Así, en la cabeza se han introducido unos acelerómetros que miden las sacudidas que recibe el cerebro ante una desaceleración repentina. En el cuello se mide lo que se estira y flexiona para cuantificar los daños cervicales. Como el maniquí está sujeto por un cinturón y puede impactar con el volante, en el pecho se mide la respuesta frente a la compresión sufrida. Tanto en el fémur como en la tibia, con ayuda de unas bandas extensiométricas, se mide la compresión generada por la colisión, además de la flexión en la parte inferior de la pierna. La pelvis es también una zona sensible de modo que su movimiento también se analizará.

Por último, el objetivo del ensayo también consiste en tomar el valor de ciertos parámetros sobre el vehículo y estudiar cómo afectan. Además, se debe verificar otros aspectos del funcionamiento del vehículo que en caso de accidente deben estar intactos. A continuación, se exponen algunas de las medidas a tener en cuenta para evaluar la gravedad de un accidente frontal en un vehículo:

- Desplazamiento del volante: tanto en vertical como en horizontal. Es la zona que puede desplazarse y golpear al maniquí que hace de conductor del vehículo.
- Puertas: pueden deformarse hacia dentro del habitáculo y comprimir el costado de los ocupantes.
- Acceso al habitáculo tras el impacto y liberación de los maniquíes (dummies): en vehículos de techo rígido deberá poder abrirse al menos una de las puertas por fila de asientos. Si alguna de las filas no consta de puertas, deberá poderse inclinar los asientos para sacar del habitáculo al dummy. Además, el cinturón de seguridad debe poder liberarse aplicando una fuerza máxima de 60 N.

- Fugas de combustible: si el vehículo se alimenta con combustible líquido suele ofrecer pequeñas fugas. Sin embargo, el máximo caudal permitido, aunque esté mezclado con otros líquidos del circuito, no deberá sobrepasar los 30 g/min.
- Desaceleración: en el pilar detallado en colores en la Figura 19, que corresponde al lado del choque, se monta un acelerómetro.

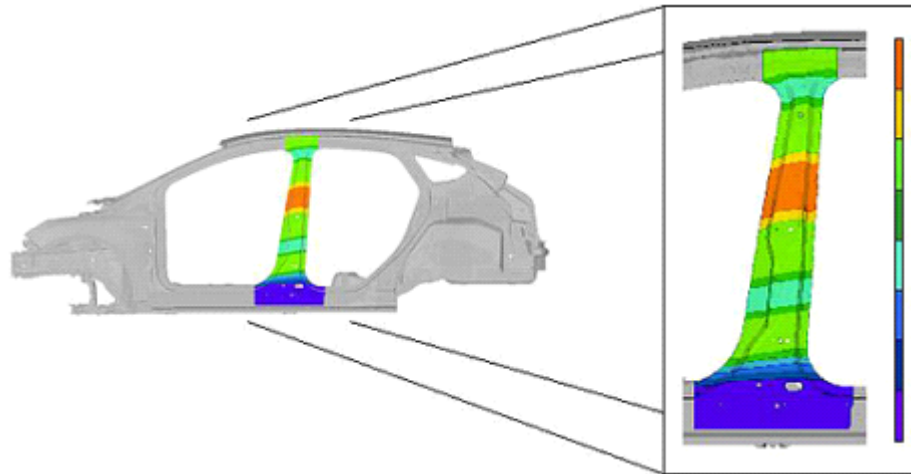


Figura 19. Acelerómetro colocado en pilar de la puerta de un vehículo

### 3.4 OTROS ASPECTOS CONSIDERADOS EN LA UN94

El presente Reglamento es muy extenso y con información sobre múltiples aspectos. En este proyecto, se ha contemplado desde un punto de vista general pero también se incluyen especificaciones de:

- Características constructivas y anclaje de la barrera deformable contra la que impacta el vehículo.
- Sistema de coordenadas para medir cotas del vehículo, posición y desplazamiento de los maniquíes, deformaciones del habitáculo, etc.
- Metodología para determinar la posición en la que deben ubicarse los maniquíes (torso, piernas, brazos, etc.)
- Normas que deben cumplir los maniquíes utilizados.
- Frecuencia en la cual se registrará cada tipo de datos relacionado con los ensayos.
- Especifica otros Reglamentos de las Naciones Unidas para los cinturones de seguridad y anclajes de los asientos de los vehículos detallados.



## 4 DESARROLLO DEL MODELO

Uno de los objetivos planteados en este proyecto consiste en analizar el larguero de un vehículo concreto, estudiar algunos parámetros y diseñar un prototipo que lo mejore.

La resolución de este ejercicio por el método manual es inviable. El tiempo requerido para su análisis por elementos finitos requiere de un gran número de horas para la complejidad de la pieza. Es por ello que se ha requerido la ayuda de un software que implemente el modelo en un código de elementos finitos. Lo que el software de análisis computa en un día, una persona podría ocuparle una duración de meses.

De este modo, para desarrollar esta parte del proyecto mediante un computador se ha realizado una serie de fases:

- Primero, se buscó un vehículo que tuviese un larguero acorde al proyecto que se deseaba realizar. Tras observar las características de algunos coches, se escogió el Opel Astra 2.0 DTI del año 2001. Este modelo de vehículo carece de las punteras que algunos vehículos tienen en el extremo de los largueros, por lo que a la hora de diseñar resulta más simplificado.
- A continuación, se necesitan las cotas del larguero para poder realizar su diseño asistido por computador (CAD).
- El siguiente paso era modelar en un software de diseño el larguero del parachoques delantero del Opel Astra que se había seleccionado para el proyecto haciendo uso de las cotas anteriormente tomadas. El software que analiza la pieza por elementos finitos también está equipado con ciertas herramientas de diseño. Sin embargo, estas herramientas son tan limitadas que se decidió por escoger un programa de CAD que fuese más completo en este aspecto.
- Por último, una vez se ha diseñado el larguero en el programa de CAD se guarda este archivo en formato .igs para poder importarlo dentro del programa de CAE y realizar un análisis por elementos finitos. En este software de análisis, se introduce todo lo relacionado con el ensayo a simular y el material de la pieza en cuestión. Una vez establecidos los parámetros necesarios, se comienza con el método de elementos finitos y a la visualización de las respuestas obtenidas ante él.

### 4.1 ESPECIFICACIONES DEL LARGUERO ORIGINAL

Cada modelo de vehículo incorpora un larguero de parachoques específico. Esta pieza no puede ser universal para todos los modelos puesto que deben soportar unos esfuerzos diferentes debido al peso del vehículo y otras características que lo definen.

Para estudiar la geometría y conocer las cotas del larguero en cuestión, primero se intentó que la marca Opel proporcionara los datos necesarios para su posterior modelización. Al no obtener respuesta, se requirió utilizar un método más rudimentario y tomar las medidas

directamente sobre un modelo de coche acorde con el que se estudia en este proyecto.

El larguero que lleva el vehículo seleccionado para este proyecto, el Opel Astra 2.0 DTI del año 2001, no tiene formas muy complejas para poder reproducir su análisis mediante elementos finitos. En su extremo más próximo a la parte frontal comienza con una sección rectangular más ancha que alta con el fin de encajar con el área de la traviesa y absorber mayor parte del impacto. A continuación, a medida que uno se desplaza hacia la bancada de suspensión, la sección disminuye hasta un punto en el que vuelve a crecer. El motivo de este cambio de sección es que en caso de impacto el larguero sufrirá un desplazamiento de su extremo delantero hacia arriba liberando el motor y dejando que caiga al suelo evitando que entre en la cabina del piloto. Además, este crecimiento se hace a la inversa del otro extremo, es decir, la sección es más alta que ancha.

Para reducir peso en el vehículo pero mantener la seguridad en él, el larguero está formado por una plancha de acero al boro de alta resistencia de forma que en su interior está hueco. El espesor de esta plancha es de unos 3mm, tomando esta medida para los futuros cálculos.

Por otro lado, el larguero que lleva el modelo original incorpora unos pliegues o hendiduras hacia dentro y hacia afuera que sirven para controlar mejor la deformación programada. En las siguientes figuras se puede ver de forma más detallada los diferentes tipos de pliegues que tiene en el extremo delantero (ver Figura 20 y Figura 21):



Figura 20. Pliegues en lateral del larguero, dos hacia afuera y uno hacia dentro



Figura 21. Pliegue En parte superior, curvatura hacia dentro

En las imágenes se aprecian unos pliegues con pronunciados hacia dentro y hacia fuera de la chapa formando unos pliegues. Estos pliegues sirven como puntos de la deformación programada.

Inicialmente, se utilizó todas estas geometrías y cotas para diseñar la pieza en el programa CAD. Lo más complicado fue hacer posible la forma redondeada de los pliegues que daba incompatibilidad por choque entre las superficie interior y exterior del espesor. Sin embargo, usando un recorte y redondeos de superficies hechas mediante bocetos en los planos adecuados se consiguió realizar el reto. En la Figura 22 se puede observar el larguero original, previamente a las simplificaciones que se le tendrán que realizar, diseñado en el programa de CAD correspondiente:

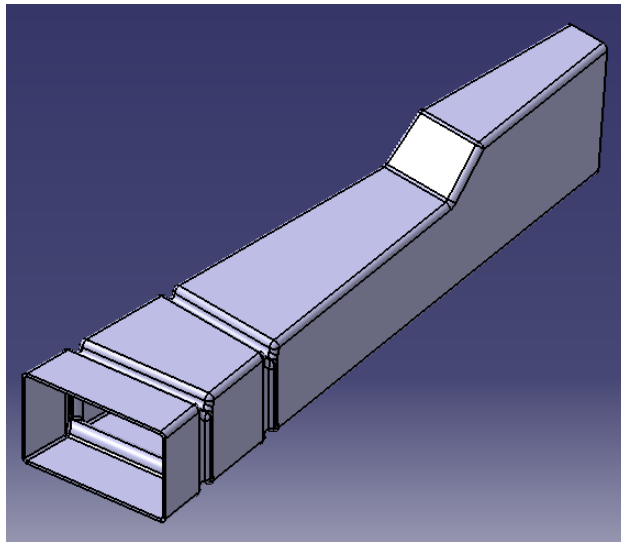


Figura 22. Diseño larguero original con pliegues y bordes redondos (previo a las simplificaciones), Catia

## 4.2 DISEÑO

El diseño del larguero se ha realizado con un programa de altas prestaciones, CATIA (ver Figura 23), utilizado en las grandes empresas de ingeniería. Aunque la versión utilizada ha sido la estudiantil, tenía los módulos necesarios para la construcción del modelo. Existen otros programas de diseño por computador como AutoCAD, Solidworks o SolidEdge, sin embargo estos producen mayor número de fallos por tanto se decidió utilizar CATIA ya que era un programa conocido por el autor de este proyecto.



Figura 23. Portada Software CAD, Catia [15]

De este modo, el programa CATIA permite realizar las piezas por diferentes métodos. Los más utilizados son por generación de sólidos y por superficies. Normalmente, si utilizas el de superficies tienes que combinarlo con la generación de sólidos para dar consistencia a la pieza.

En este proyecto, primero se realizó la superficie exterior con el módulo superficies. Para ello se estructuró la pieza en cuatro partes, la cara de arriba, la cara de abajo y las dos caras laterales que tiene el larguero. En cada una de las cotas importantes, se colocó un plano y se dibujó una línea. Posteriormente, las diferentes líneas de cada cara se unieron mediante una herramienta llamada multi-sections surface para crear una superficie. Las líneas se hicieron un poco más grandes de lo normal para no obtener error en las futuras operaciones por lo que las superficies también resultaron mayores.

Los pliegues tienen un redondeo en cada esquina de unos 5mm. Como se ha mencionado antes, estos pliegues se realizaron mediante el recorte y redondeo (herramienta Fillet) de superficies formadas por la existente en el exterior, otra que viene de un offset de la anterior, y bocetos en planos perpendiculares a las dos superficies anteriores que se sitúan en los puntos de inflexión de dos redondeos consecutivos del pliegue, es decir, dos planos perpendiculares por cada pliegue.

Las superficies eran demasiado grandes por lo que el siguiente paso era recortarlas con la herramienta Trim. Sin embargo, conociendo la herramienta Fillet, que además de recortar

también se redondea la arista resultante de la primera operación, se decidió utilizar esta para dar un radio a las aristas vivas de toda la pieza, este radio también fue de 5mm. Para la parte de frontal y trasera sí se utilizó un Split que cortó superficies mediante los correspondientes planos de esas caras.

Por último, cambiando de módulo de superficies al módulo de sólido, se procedió a dar espesor a la superficie generada. La herramienta utilizada fue ThickSurface y se aplicó un espesor a toda la pieza de 3mm.

El resultado de la pieza obtenida mediante el programa CATIA junto con algunas de las herramientas utilizadas se puede ver en la siguiente Figura 24.

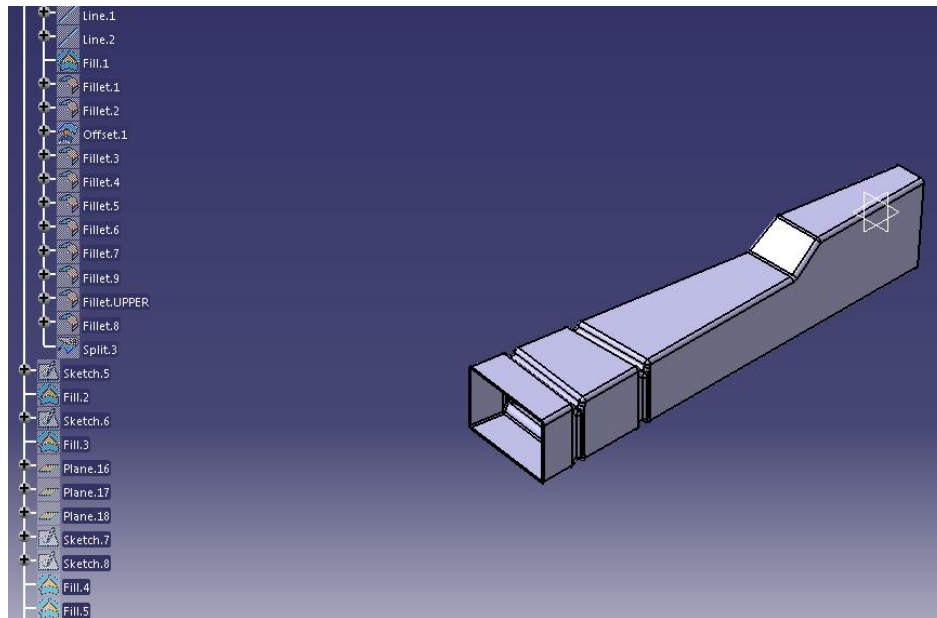


Figura 24. Operaciones utilizadas para modelizar el larguero original, Catia

A la izquierda de la imagen el árbol de operaciones aparece mayoritariamente las herramientas de Fillet utilizada para todos los redondeos de la pieza y el Fill apoyado de los Sketch para dibujar superficies planas con el fin de apoyar para realizar el Fillet de los pliegues.

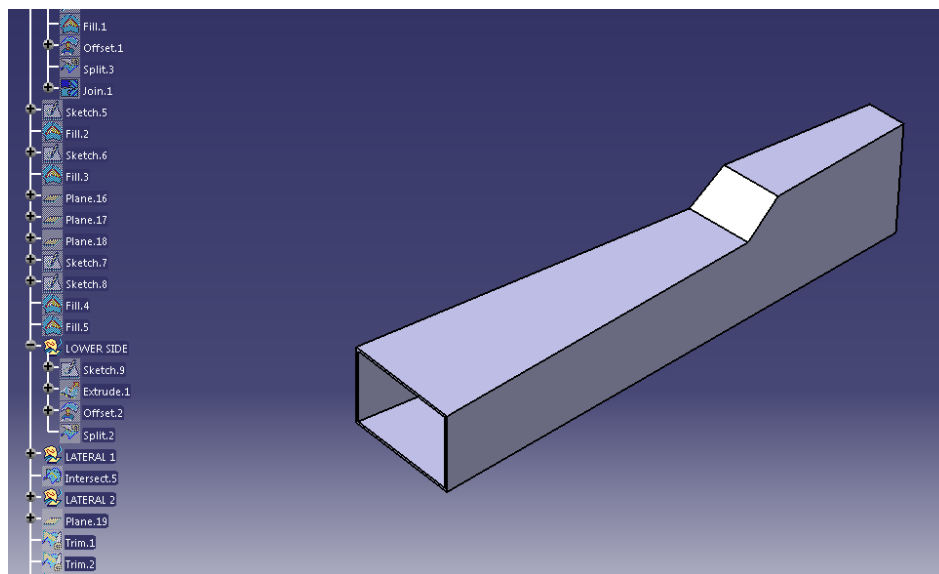
### **MODELO ORIGINAL**

Inicialmente se contaba con estudiar el modelo que se acaba de describir. Sin embargo, por cuestión de incompatibilidad de geometría con el programa al que se someterá la pieza para analizar las deformaciones que sufre en una colisión, estos pliegues han tenido que ser eliminados. Del mismo modo, las aristas que contaban con un redondeo inicial de unos 5mm han tenido que simplificarse como aristas vivas para proceder a su análisis. La explicación que tiene es que los programas de diseño realizan los redondeos como una

simple visualización y no llevan un código que los reconozca como un ente físico. Así, al analizarse en un programa que necesita conocer la posición de cada punto de esta geometría, no lo reconoce y da error.

Esta simple eliminación de los redondeos obliga a cambiar algunas de las operaciones ya que si se recuerda el Fillet se había utilizado para recortar y redondear. Ahora simplemente se procederá a cambiar esta herramienta por una de recortar dos superficies entre sí y pegarse en una misma (herramienta Trim).

A continuación, en la Figura 25 se verá la imagen de la pieza resultante que queda tras el cambio de herramientas:



**Figura 25. Larguero original sin pliegues ni bordes redondos (simplificado) con operaciones de modelizado, Catia**

En la imagen puede verse que han desaparecido los pliegues dejando una superficie recta sin discontinuidad además de unos bordes convertidos en aristas.

El árbol de la izquierda muestra herramientas como duplicar una superficie en una dirección (offset), cortar una superficie utilizando otra (Split), unir varias partes en un uno (Join), rellenar el área (herramienta Fill) hecha con un boceto en la herramienta Sketch, el Extrude para prolongar un perfil en una dirección y el trim para recortar dos superficies entre sí y pegar las partes resultantes en uno.

Utilizando el mismo programa de CAD, en el módulo de Drafting, se puede extraer el plano de las vistas principales de la pieza. En este módulo, la acotación se realiza de forma manual utilizando el criterio que más se crea conveniente. Cuando una medida que acota un mismo tipo de geometría se repite varias veces en el plano, al lado de la cota se pone entre paréntesis las siglas “TYP”, indicando que la cota es típica en toda la pieza. Ejemplo de este método se pudo ver en el espesor, que se mantiene constante a lo largo del

larguero. En la Figura 26 se puede observar este plano.

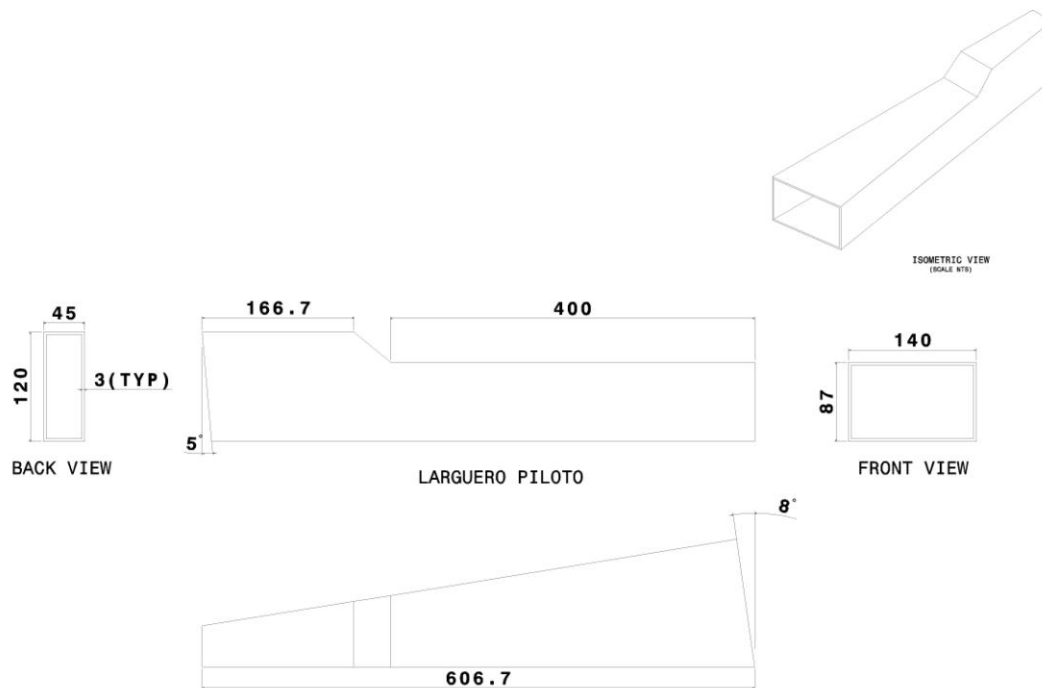


Figura 26. Plano larguero original simplificado, Catia

#### 4.3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Para el análisis del larguero sometido a un ensayo de choque frontal mediante elementos finitos, se ha hecho uso de un programa CAE (Computer Aided Engineering) llamado “ABAQUS” (Figura 27). Este programa también es muy utilizado por grandes empresas de ingeniería puesto que ofrece soluciones con gran diversidad de variables. Además, es bastante intuitivo y compila los datos con alta exactitud.

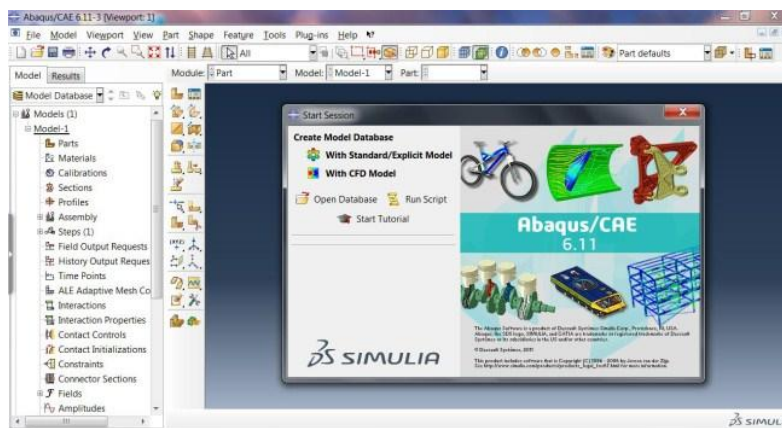


Figura 27. Portada software de CAE, Abaqus

El programa tiene diferentes fases o módulos en los que se introducen diversos parámetros de las condiciones de contorno y la forma en que se desea realizar el ensayo. A continuación, se explicará cada uno de los módulos incluyendo alguna relación con el modelo original.

#### • PART

El programa permite crear la pieza en este módulo o bien, desde el mismo se puede importar una pieza creada en otro programa de CAD. Es importante recalcar que Abaqus, al igual que muchos códigos de Elementos Finitos no utilizan unidades, es decir, trabaja con números y sólo resuelve ecuaciones numéricas. Debido a esto es necesario utilizar unidades coherentes en todo momento, lo más aconsejable para usuarios no expertos es emplear las unidades del sistema internacional (metro, kilogramo, segundo, newton) de este modo las tensiones se miden en pascuales (Pa) y las deformaciones en tanto por uno [16]. Por el contrario, si el modelo es importado desde otro software, las unidades que se utilicen en todo el análisis deberán estar acorde con las que se hayan utilizado para diseñar la pieza. Las herramientas que este módulo contiene para poder desarrollar la pieza son limitadas (tipo sólido) y debido a la geometría que la define se debe construir por el método de superficies. Como finalmente este proyecto se ha realizado con la segunda opción, el archivo del modelo hecho con el programa de diseño se debe guardar con extensión “.igs” para poder abrirlo en el software de CAE.

Si se desea someter a ensayo un conjunto de varias piezas, cada una de estas deberá introducirse como una “part”. Para el caso en el que un conjunto está formado por varias piezas iguales, con importar una será suficiente puesto que será en otro modulo donde se creen las copias que se requieran.

Al inicio del proyecto se realizó un conjunto compuesto por el larguero del lado del piloto, el larguero del lado del copiloto y la traviesa que los une. Sin embargo, observando la Figura 28 se ve como la traviesa absorbe casi todo el golpe siendo prácticamente nulos los esfuerzos transmitidos a los largueros. En una situación real esto no ocurre, pero es inevitable al prescindir de algunos elementos que forman la estructura del parachoques delantero.



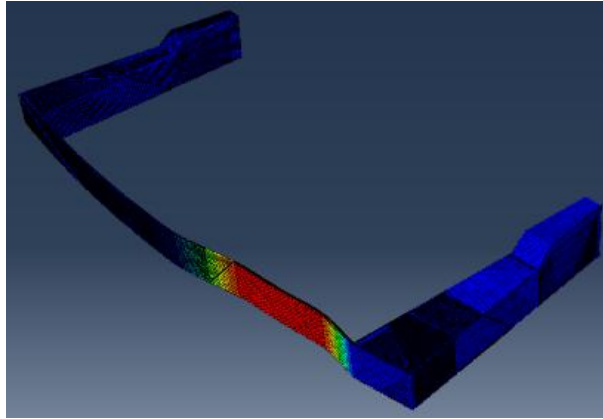


Figura 28. Conjunto largueros-traviesa analizado en CAE, Abaqus

Tanto al importar como al crear la pieza desde este módulo, aparece una solicitud en la que se debe explicar qué tipo de pieza es (deformable, rígida o un fluido) y la forma en que se ha diseñado (sólido, chapa, cable o por puntos).

Con el conjunto, el ensayo no daba resultados muy lógicos ni acordes con una situación real, por lo que se decidió prescindir de la traviesa y el larguero del copiloto. Por tanto, el análisis se centra en el larguero del piloto (lado izquierdo) ya que al estar la columna de dirección tiene mayor riesgo de lesiones importantes para el ocupante. De esta manera, puesto que se busca analizar la deformación y otros parámetros que sufre el larguero durante la colisión, se elige un comportamiento de la pieza deformable. Para el método utilizado al diseñar la pieza, a pesar de haberse desarrollado por superficies, el producto final de todas esas operaciones es un sólido.

#### • PROPERTY

Las propiedades del material asignadas a cada Part son muy importantes. Dependiendo del material utilizado, el comportamiento frente a una carga podrá verse afectado de una manera u otra. Si el material tiene unas propiedades muy dúctiles el larguero se deformará considerablemente y absorberá mejor el impacto del ensayo. El exceso de deformación puede ser negativo ya que uno de los objetivos del larguero es impedir que el motor entre en el habitáculo del vehículo. Por otro lado, si las propiedades del material son muy duras, la carga producirá una desaceleración muy grande y con ello, posibles daños internos en los ocupantes del vehículo.

El módulo de property consta de tres fases para asignar el material a la pieza:

- Primero se debe crear el material con el nombre y las propiedades correspondientes.
- A continuación se indicará el comportamiento del material en la pieza, es decir, si es un sólido con propiedades homogéneas, un material compuesto o un fluido viscoso.
- Por último, se asigna el material creado a la pieza correspondiente.

Independientemente del modelo mecánico con que se desee analizar la pieza, la densidad es una propiedad indispensable que se debe proporcionar.

La mayoría de los materiales inicialmente poseen unas propiedades elásticas. Para definirlos basta con poner el módulo de Young, o de elasticidad, y el coeficiente de Poisson.

La deformación plástica puede llevar asociado un endurecimiento del material que aumenta el límite elástico en sucesivas deformaciones. Este endurecimiento puede relacionarse con un modelo mecánico. El software de Abaqus te proporciona por defecto un modelo isotrópico en el que las dos únicas variables que pide son la tensión máxima (Yield Stress) y la tensión de rotura (Plastic Strain). Sin embargo, este modelo ofrece poca información por lo que es preferible utilizar otro que tenga en cuenta más variables.

El modelo de Johnson – Cook [17] es un modelo mecánico de material que fue desarrollado especialmente para modelos metálicos implicados en condiciones de impacto. El modelo mecánico de Johnson – Cook reproduce el comportamiento de los materiales sujetos a grandes deformaciones, altas temperaturas y altas velocidades de deformación. La formulación de este método define la tensión equivalente de Von Mises como tres términos desacoplados donde el primero de ellos define la dependencia del endurecimiento con la deformación, el segundo con la velocidad de deformación y el tercero la sensibilidad con la temperatura. Explicado de otra forma, la tensión equivalente de Von Mises se queda expresada en términos de la deformación, la velocidad de deformación y una temperatura adimensional normalizada.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[ 1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] (1 - Th^m)$$

$$Th = \frac{T - Tr}{Tf - Tr}$$

• Donde:

A= Límite elástico inicial

B= Constante de endurecimiento

C= Constante de proporcionalidad

n= Coeficiente de endurecimiento

m= Coeficiente de ablandamiento térmico

$\varepsilon$ = Deformación plástica equivalente

$\dot{\epsilon}$ = Velocidad de deformación plástica equivalente

$\dot{\epsilon}_0$ = Velocidad de deformación plástica equivalente de referencia

$T_h$ = Temperatura no dimensional normalizada

$T$ = Temperatura del material en cada instante

$T_r$ = Temperatura de referencia

$T_f$ = Temperatura de fusión

## ALUMINIO

El aluminio es un material muy ligero pero de bastante resistencia. En las pruebas iniciales que se realizaron con el conjunto larguero-travesa, el aluminio fue asignado a la travesa. Esta parte del parachoques es de este material para restarle peso a la estructura pero que a la vez pueda transmitir con bastante eficacia la carga a los largueros.

A pesar de haber realizado las pruebas finales sin este elemento, el valor de sus propiedades se usó para el primer análisis. De esta forma, en la siguiente tabla (ver Tabla 2) se pueden ver los valores de las propiedades elásticas impuestos para el aluminio:

DENSIDAD [Kg/m <sup>3</sup> ]	MÓDULO DE YOUNG [N/mm <sup>2</sup> ]	COEFICIENTE DE POISSON [-]
2698	70000	0.33

Tabla 2. Propiedades elásticas del aluminio [18]

## ACERO AL BORO

El acero al boro es un material metálico de alta resistencia, y aunque existen otros de aún mayor resistencia, el escogido en este proyecto es suficiente para el objetivo de los largueros de un parachoques. Así, la dureza que se indique nunca es completamente fiable debido a que corresponde con la tomada antes de un tratamiento superficial. Después de tratar la superficie, la dureza aumenta haciendo que la resistencia del material aumente. Además, aunque sea en pequeños porcentajes, el boro unido a algunos compuestos propios de un acero produce una fase en el material que aumenta la dureza.

Aunque el chasis de un vehículo está formado por elementos de distintos materiales metálicos, los largueros del parachoques delantero son, por lo general, de acero al boro. El porcentaje de boro en el acero escogido para esta pieza es de 0,0015%.

A continuación se muestran la densidad y los datos correspondientes con la deformación elástica introducidos en el módulo de property para el larguero (ver Tabla 3):

DENSIDAD [Kg/m <sup>3</sup> ]	MÓDULO DE YOUNG [N/mm <sup>2</sup> ]	COEFICIENTE DE POISSON [-]
7790	206000	0.3

Tabla 3. Propiedades elásticas del acero al boro [19]

Por otro lado, en la Tabla 4 se pueden ver los datos correspondientes al modelo de Johnson-Cook que pide el software para el acero al boro usado en el larguero del proyecto:

PARÁMETROS	SIMBOLOGÍA	UNIDADES	VALOR
Límite elástico inicial	A	MPa	1268
Constante de endurecimiento	B	MPa	3340
Constante de proporcionalidad	C	-	0.0114
Coeficiente de endurecimiento	n	-	0.89
Coeficiente de ablandamiento térmico	m	-	0.94
Temperatura de referencia	Tr	K	293
Temperatura de fusión	Tf	K	1800
Velocidad de deformación plástica equivalente de referencia	$\dot{\epsilon}_0$	s <sup>-1</sup>	1

Tabla 4. Parámetros Johnson-Cook para el acero al boro [20]

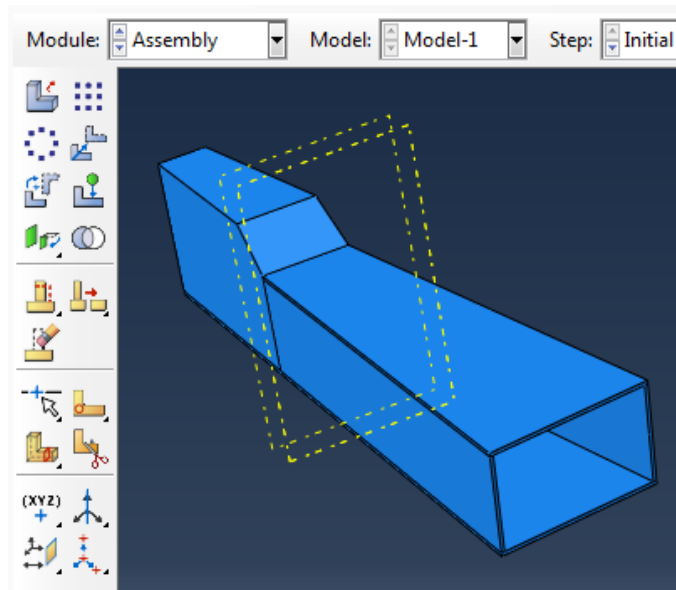
- **ASSEMBLY**

El módulo assembly, como su nombre indica, sirve para ensamblar las diferentes partes que formen el conjunto de partes. Además, como puede haber piezas iguales, se especifica si la “part” que se introduce en el conjunto es dependiente o independiente del “part original”. Si se introduce como dependiente, cuando se malle el part original, tendrá el mismo mallado que este último. Si por el contrario la pieza está en modo independiente, podrá llevar un mallado diferente al del resto de piezas semejantes.

En el caso que se realizó de todo el conjunto (dos largueros más travesaño), cada larguero se introdujo como independiente ya que al tener mayor importancia el lado del piloto este debería mallarse con mayor número de elementos.

Por otro lado, al simplificar el ensayo a un solo larguero, daba igual como se introdujese la pieza. Sin embargo, como algo más lógico al pasar de tener un conjunto a una sola pieza, se debe introducir como pieza dependiente.

En este y otros módulos la pieza adquiere un color azul que notifica los últimos cambios realizados. En la siguiente figura (ver Figura 29) se puede ver la configuración de herramientas de este módulo y el color azul de la pieza resultante:



### Figura 29. Módulo Assembly de Abaqus

## • STEP

En este paso se definen las condiciones del ensayo a realizar, por ejemplo, su duración. En función de cuanto mayor sea el tiempo que dure el ensayo mayor será el coste computacional del análisis. Por otro lado, si se escoge un tiempo muy reducido no se obtendrán unos resultados muy fiables ya que al material no le ha dado tiempo a deformarse lo suficiente. Al principio se comenzó con un tiempo de análisis de 0.001s, pero al ser demasiado pequeño y no apreciarse los cambios se decidió aumentar a 0.01s sin que afectase considerablemente al tiempo computacional.

Además, al tratarse de un impacto, el tipo de step seleccionado será dynamic-explicit, mediante el cual se empleará un método explícito de integración de las ecuaciones del movimiento.

## • INTERACTION

En este apartado se definen las interacciones existentes entre las diferentes piezas de un conjunto, así como los contactos producidos entre diferentes zonas de la misma pieza debido a las elevadas deformaciones que esta pueda sufrir.

En el conjunto inicial largueros-traviesa, cada larguero estaba unido a la traviesa. Esta unión hay que definirla para saber qué tipo de desplazamiento y deformación sufrirán ambas partes en este punto. Así, el tipo “tie” (soldadura) es la mejor opción para la mayoría de casos.

Además, las partes del conjunto pueden chocar unas con otras y consigo mismas. Para que el programa tenga en cuenta esta situación se debe poner una consideración sobre las piezas de “contacto general”.

Sin embargo, como el modelo final que se desarrolla en este proyecto solo consta del larguero del piloto, desaparecen las soldaduras que lo unían a la traviesa. La consideración de contacto general se mantiene para la pieza pues al deformarse puede chocar consigo misma.

## • LOAD

Este módulo es de los más importantes para realizar correctamente el ensayo y obtener resultados coherentes. La carga y la forma en que esta se aplique condicionarán la deformación y otros factores. Además, las condiciones de contorno (Boundary Condition) también son incluidas en esta sección.

El larguero es una pieza del parachoques delantero que rodea al motor. Esto supone que

el motor transferirá parte del calor producido a este elemento. Haciendo una media entre la temperatura que puede llegar a tener el aceite (80-110°C) y la culata del motor (270°C) se estima la temperatura aproximada del larguero en el instante del impacto [21], es decir, unos 70°C [343K]. Esta temperatura evolucionará según las condiciones del impacto. Este factor es muy importante ya que hace que el material pierda resistencia y su deformación sea mayor. De este modo, incluido como un campo predefinido sobre toda la pieza, se incorpora una temperatura inicial de 70°C.

Las condiciones de contorno que más se requieren son las restricciones de movimiento que sufre la pieza. Si el movimiento de la pieza no estuviese limitado, la carga no crearía ningún tipo de esfuerzo, es decir, la pieza no se deformaría.

Las condiciones de contorno aplicadas sobre el larguero han sido: en primer lugar una condición de empotramiento (encastre) de la sección transversal trasera del mismo, la cual está soldada a la bancada de suspensión; y en segundo lugar, la aplicación de la velocidad de impacto en la sección transversal frontal del larguero (zona que estaría soldada a la traviesa en un ensayo real).

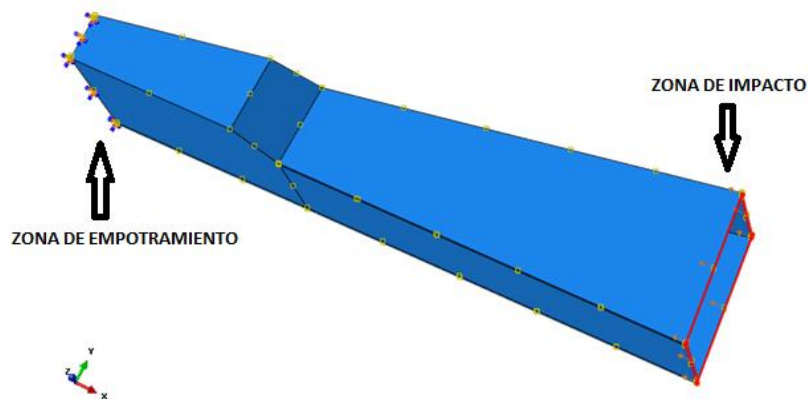


Figura 30. Larguero original con zona de carga de impacto y zona de empotramiento

En la Figura 30 aparece la imagen del larguero cuya sección frontal está remarcada de color rojo. En esta sección se ha aplicado la carga de velocidad constante. Las flechas de color naranja indican el sentido de la carga.

Por otro lado, la misma imagen contiene unos puntos en la sección trasera que indican la total restricción de movimiento. Cada punto está formado por tres pequeñas bolas azules indicando que restringen el movimiento y el giro en todos los ejes.

El resto de puntos amarillos que aparecen por toda la pieza indican una condición de temperatura impuesta sobre ella.

- **MESH**

El mallado sirve para definir la precisión del método de análisis por elementos finitos. Este método consiste en discretizar la pieza que va a ser analizada, mediante la definición de una red de puntos a lo largo de todo el volumen de la misma llamados nodos. Al espacio encerrado en el interior de varios nodos se denomina elemento. Sobre cada nodo se aplican las cargas y empotramientos del ensayo. Aplicando las ecuaciones de equilibrio y los parámetros anteriores a los nodos y elementos, se estudia el desplazamiento que sufren los nodos. A continuación, con las funciones de forma se extrapola la información de los desplazamientos a los puntos de Gauss y es en estos donde se obtiene el resto de parámetros que se desean evaluar. Por ello, cuanto mayor sea el número de nodos se obtendrá información más exhaustiva sobre el ensayo realizado [22].

En piezas con geometría variable, como es la de este proyecto, es conveniente realizar particiones en la misma, de forma que se mejore el proceso de mallado. De esta manera, en la Figura 31 se puede observar la partición que se ha realizado en el larguero original antes de ser mallado:

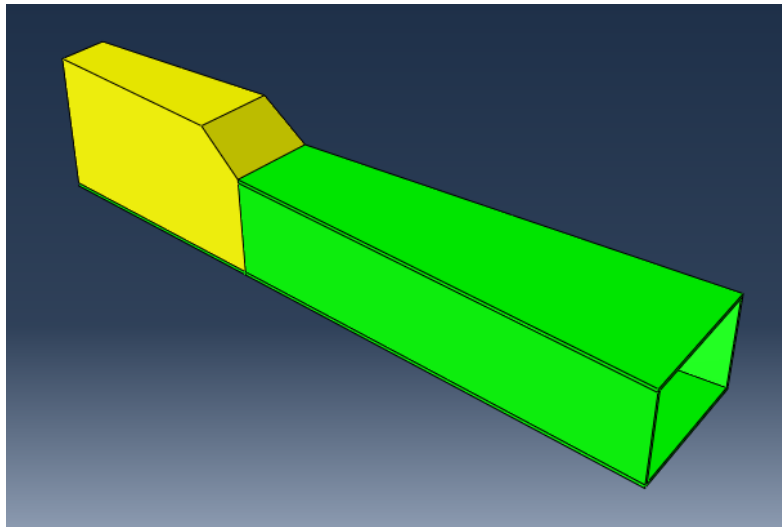


Figura 31. Partición del larguero original

En la imagen se observan dos colores, el amarillo y el verde. El amarillo representa una parte de la pieza que se puede mallar pero de forma más irregular (mallado por barrido). Por el contrario, el color verde significa que ese volumen puede mallarse de forma totalmente estructurada por lo que la malla obtenida en esa zona será más regular.

Por otro lado, si la partición que se realiza en la pieza da lugar a volúmenes complejos, dicha zona aparecerá resaltada en color naranja, lo cual indicaría la imposibilidad de mallarse, debiendo eliminar la partición o modificar la geometría de esta zona.

A continuación, se debe indicar el tipo de elemento que se desea utilizar en cada zona de



la pieza. Para la obtención de resultados más precisos, es conveniente aplicar el mismo tipo de elemento para todo el larguero. Así, dentro de las opciones que dispone el programa, se ha escogido una con la denominación C3D8R. Esta terminología es un código en el que cada una de sus letras indica una determinada información. La “C” representa la forma “Cúbica” del elemento, “3D” que es un elemento tridimensional, el número 8 son los nodos que definen dicho elemento y la “R” que se trata de un elemento de integración reducida, es decir, dentro del elemento solo existe un punto de Gauss. La forma hexaédrica es la forma más completa para definir el elemento y se deformará para acoplarse de la mejor manera a la geometría de la pieza.

Una vez realizadas las particiones oportunas en la pieza, se procede a generar los nodos sobre la misma, hay varias formas de hacerlo. Una manera es indicar directamente el número de elementos que se requiere para las regiones seleccionadas de la pieza. De una forma similar, se puede dar el tamaño aproximado de los elementos y el programa te calcula los elementos resultantes para el volumen seleccionado. En este último caso, hay una herramienta avanzada para estructurar mejor el mallado que consiste en indicar la arista deseada y darle el número o tamaño de los elementos que discurren por ella. Además, puede variarse de forma progresiva (herramienta “bias”) el tamaño o número de los elementos a lo largo de todo el borde.

Para el larguero que se estudia en este proyecto, se ha realizado un análisis de sensibilidad de la malla, tal y como se expone más adelante, variando el tamaño de los elementos empleados y analizando los resultados obtenidos para cada uno de ellos. De esta forma, se identificará cuál de los mallados creados es la que obtiene mejor calidad en los resultados sin requerir de un coste computacional excesivo. El software permitía un tamaño máximo de elemento de 8mm, por lo que se realizaron varios mallados reduciendo el tamaño de elemento en 1 mm, hasta llegar a un tamaño mínimo de 2 mm. En la siguiente figura (ver Figura 32) se puede ver un ejemplo del larguero mallado:

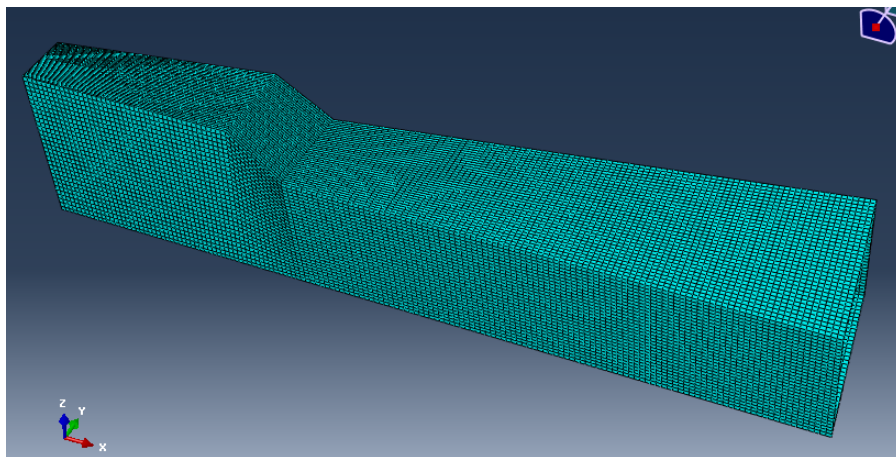


Figura 32. Mallado a tamaño 4 mm del larguero original

- **JOB**

En el módulo de Job se genera, con el nombre deseado, el análisis por el método de elementos finitos del ensayo en el que se han fijado todas las especificaciones de los anteriores módulos.

Además, se puede monitorizar el ensayo para ver la iteración que está analizando y el tiempo transcurrido hasta llegar al tiempo total.

- **VISUALIZATION**

El análisis creado en el anterior módulo estudia diferentes parámetros, algunos de ellos son: aceleración, reacciones en los empotramientos, desplazamientos, deformaciones, tensiones, etc. En este apartado, pueden visualizarse cada uno de estos parámetros, observando su evolución a lo largo de todo el tiempo del ensayo.

Además, aparece una leyenda que muestra una escala de colores con los valores más significativos del factor seleccionado que se representan en la pieza. De esta manera, mediante un sistema de colores se comprende rápidamente el comportamiento de la pieza y las zonas más afectadas. Existe una opción que nos señala el punto donde se registra el máximo y el mínimo valor del parámetro que se estudie en ese momento.

El software divide el tiempo del ensayo en tantos intervalos como se le pida y muestra la deformación de la pieza en tantas imágenes como intervalos se le haya dado. Cuanto mayor sea el número de imágenes mejor se podrá observar la evolución de la pieza durante su ensayo.

Este módulo cuenta con muchas opciones para visualizar los resultados del ensayo. Otra forma más técnica y concreta de valorar los datos obtenidos es mediante gráficas que muestran el parámetro deseado en un elemento de la malla específico a lo largo del tiempo. En el caso de las reacciones en los empotramientos, se debe seleccionar los nodos de la cara donde está la limitación de movimiento y después hacer una suma de todas las gráficas de cada uno de estos nodos, así se obtendrá la reacción total del empotramiento.

## 5 RESULTADOS Y COMPARACIONES

Tras el análisis realizado por el software Abaqus mediante el método de elementos finitos, se evalúan los datos recogidos de cada elemento. Estos datos proporcionan información sobre varios parámetros, algunos de ellos son: aceleración, velocidad, deformación, reacciones en los empotramientos, tensión y desplazamientos.

No todos los parámetros tienen un gran interés de estudio para este proyecto por lo que se han seleccionado algunos de ellos. Los desplazamientos del larguero y las reacciones en los empotramientos permiten determinar la influencia en la absorción de energía ante un impacto en el larguero.

Por tanto, primero se debe realizar un análisis de sensibilidad de la malla para seleccionar el tamaño del elemento que se va a utilizar en el resto de ensayos.

A continuación estudiar el larguero original y observar los puntos de la pieza donde presenta insuficiencia en la absorción del impacto. Con ello, pensar en una nueva geometría del modelo que busque maneras de mejorar estas partes.

Realizando los mismos ensayos para la nueva geometría del larguero se compararán los resultados con los del modelo antiguo y se determinará la mejora que ofrece.

### 5.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad tiene la finalidad de escoger un tamaño de malla acorde a la pieza y al ensayo a realizar. Un tamaño del elemento pequeño se traduce en mayor número de nodos que pueden registrar la información del análisis. Sin embargo, no es necesario un número muy elevado de nodos, siempre que no se pierda la calidad en las respuestas del análisis, ya que genera un coste computacional elevado.

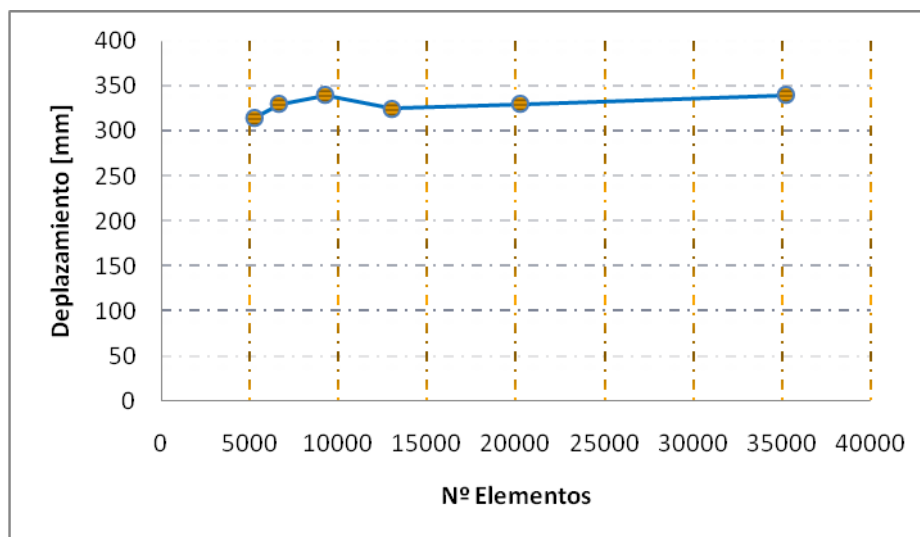
Para determinar la malla más propicia en el larguero original se le somete a varios ensayos de impacto a la velocidad de 56 Km/h con varios tamaños de mallado. Primero se estudió cual era la malla que permitía tener el tamaño del elemento más grande y partir de ahí se escogían los tamaños de mallado en el resto de pruebas para el análisis de sensibilidad. De esta forma, el mallado más grande tiene un tamaño de 8 mm descendiendo de forma gradual en 1 mm para el resto de mallas hasta llegar al tamaño 3 mm (ver Tabla 5).

ENSAYO	1	2	3	4	5	6
TAMAÑO ELEMENTO [mm]	8	7	6	5	4	3
NºELEMENTOS	5293	6675	9240	13000	20280	35190

Tabla 5. Mallas utilizadas en análisis de sensibilidad

Para determinar cuál de estas mallas será la escogida para el resto de ensayos, se debe estudiar el comportamiento de algún parámetro relevante en cada una de las mallas para un nodo concreto. Los parámetros escogidos para este análisis de sensibilidad son el desplazamiento en magnitud en un nodo escogido y las reacciones en los empotramientos. Cuando el comportamiento de estos parámetros tome una tendencia estable será a partir de aquí donde se podrá escoger una malla. Como se ha dicho anteriormente, no es necesario un tamaño de malla muy pequeño por lo que se escogerá una malla al principio de dicha estabilidad.

La siguiente gráfica muestra el desplazamiento en magnitud frente al número de elementos de cada ensayo en un nodo escogido en la parte frontal del larguero en el instante final del ensayo (ver Figura 33):



**Figura 33. Análisis de sensibilidad de la malla con desplazamiento en magnitud**

A continuación, en la siguiente figura se contempla el segundo análisis de sensibilidad usando como parámetro las reacciones en el empotramiento frente al número de elementos de cada ensayo (ver Figura 34):

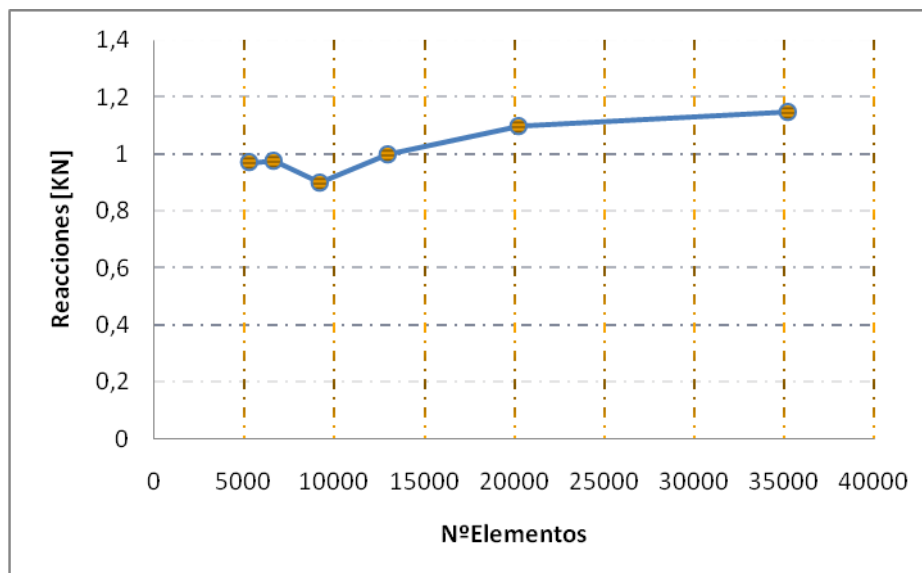


Figura 34. Análisis de sensibilidad de la malla con reacciones

Como se puede ver en las Figura 33 y Figura 34 el ensayo de impacto comienza a converger hacia una asíntota horizontal en la prueba número 5. Recordando lo anteriormente expuesto, la malla de esta prueba tiene 20.280 elementos, que a términos de tiempo es aproximadamente 1 hora de ensayo. El siguiente ensayo, a pesar de tener mayor definición, requería un coste computacional de unas 4 horas aproximadamente, por eso este se tuvo que descartar.

De este modo, la malla seleccionada para el resto de ensayos tendrá un tamaño 4 en los elementos haciendo un total de 20.280 puntos de Gauss en los que recoger el comportamiento mecánico.

## 5.2 ANALISIS FRENTE A IMPACTO DEL “LARGUERO ORIGINAL”

El larguero original se someterá a un análisis frente a impacto a varias velocidades para observar el comportamiento en diferentes situaciones. Primero se estudiará el caso concreto del ensayo que requiere la UN94 en el que la velocidad es de 56 km/h y después se comparará con las pruebas a distintas velocidades.

Este apartado debe ser más completo que en el análisis de sensibilidad de la malla. Por tanto, además de ver la respuesta de las reacciones en los empotramientos y el desplazamiento en magnitud de un nodo, se estudiará los desplazamientos en las tres direcciones principales en ese mismo nodo (ver Figura 35).

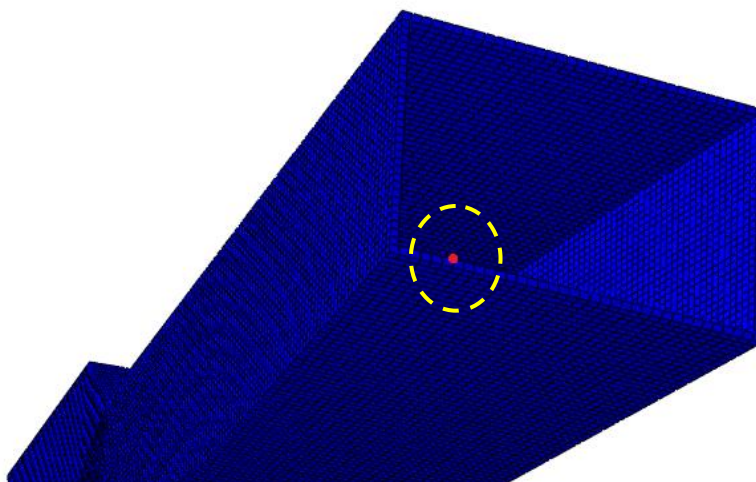


Figura 35. Nodo seleccionado para el análisis de los desplazamientos, sección frontal

El principal parámetro son las reacciones en los empotramientos ya que generan una carga hacia el resto del bastidor del vehículo denotando en unas deceleraciones instantáneas. Además, son estas reacciones las utilizadas para diseñar la continuación del larguero que forma parte de dicho bastidor.

En la siguiente figura (ver Figura 36) aparece la evolución temporal de las reacciones en el empotramiento del larguero para la velocidad de 56 km/h:

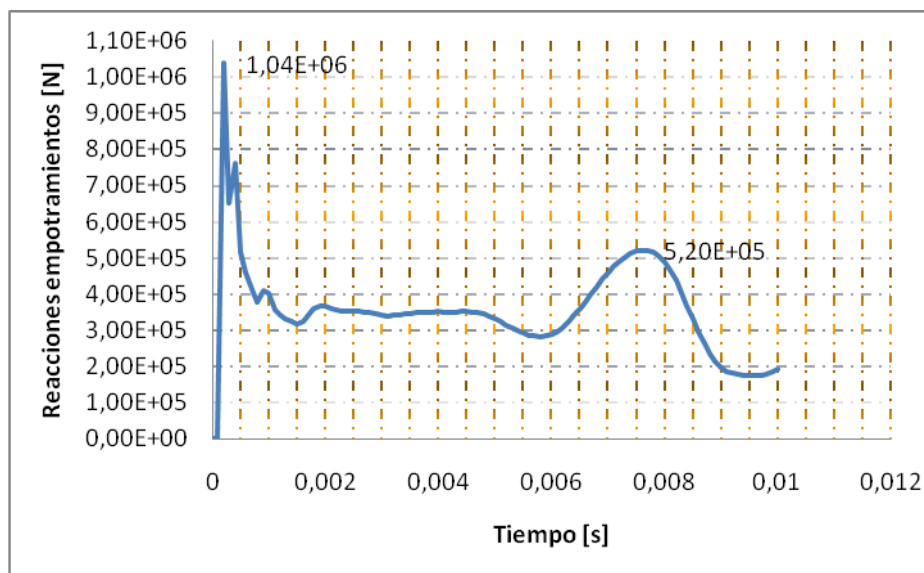


Figura 36. Reacciones en empotramiento de larguero original en función del tiempo

En la Figura 36 se puede ver como la función generada tiene varios puntos máximos y mínimos. Esto se debe a que el ensayo tiene un carácter dinámico y se crean efectos inerciales en la deformación del material. Al inicio del impacto, debido al choque frontal, se

crea el mayor punto máximo generando reacciones de 1,04 MN en el segundo 0,0002. Tras una deformación del larguero la energía del impacto comienza a absorberse y las reacciones se estabilizan en un valor medio de 0,35 MN. Tras llegar a una cierta deformación, el material endurece de modo que se crea otro punto máximo de reacción con valor de 0,519 MN en el segundo 0,0075.

El caso más técnico para cumplir con la norma de la UN94 era el ensayo a una velocidad de 56 km/h, sin embargo para intentar diseñar un modelo mejorado es necesario estudiarlo en otras condiciones. Por ello, a continuación se mostrará en la Figura 37 una gráfica que relaciona los puntos máximos de las reacciones de cada ensayo realizado a distintas velocidades. Los puntos máximos de cada ensayo variaban en el tiempo pero todos se mantuvieron en un intervalo reducido de 0,001 s al inicio del impacto por lo que el estudio siguiente tiene validez.

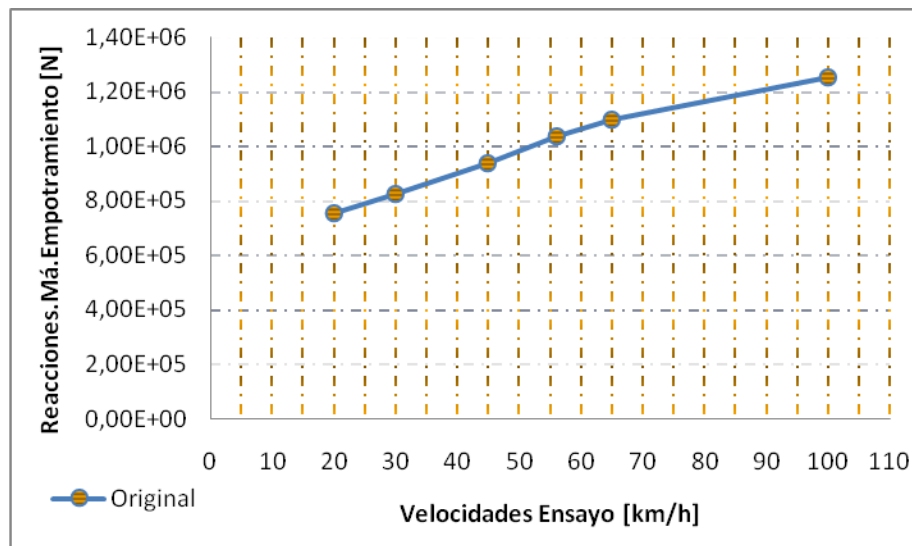


Figura 37. Gráfica de las reacciones para ensayos a distintas velocidades

Como se puede observar, el valor de las reacciones máximas mantiene un constante ascenso según aumenta la velocidad del ensayo con un comportamiento de tendencia lineal.

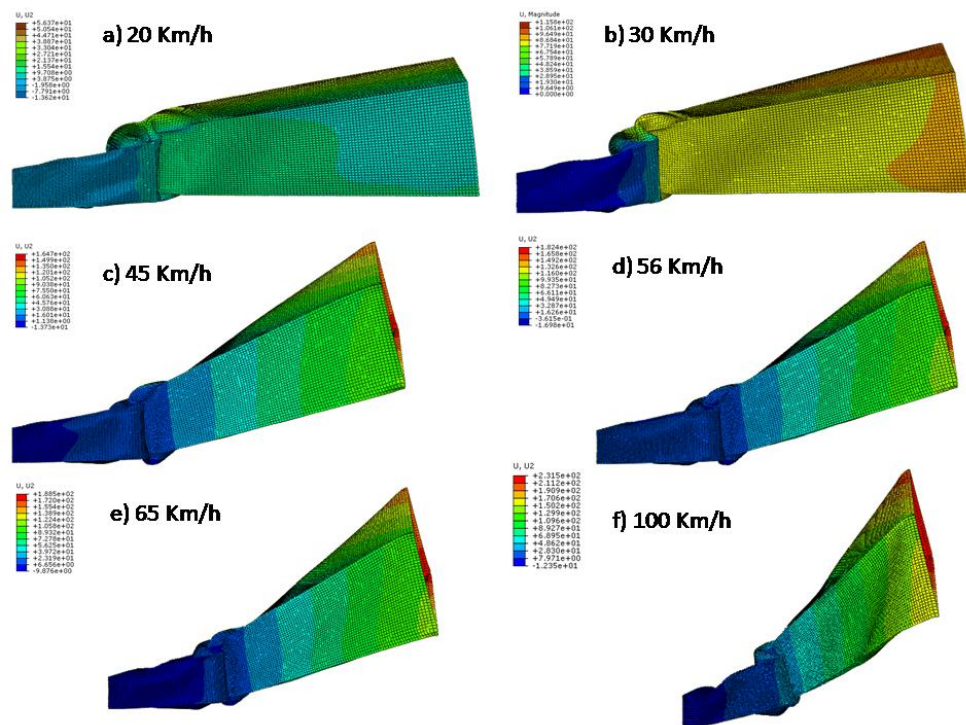
Las reacciones son menores cuanto mayores sean las deformaciones producidas en el larguero. Esto es debido a que la energía de impacto transmitida a la zona del empotramiento será menor cuanto mayor sea la energía consumida en deformar el larguero. Por ese motivo lo que se va a buscar es que el larguero sufra mayores deformaciones. Por tanto, siguiendo el procedimiento de antes, primero se expondrán los desplazamientos producidos en el nodo de la Figura 35 para la velocidad de ensayo de la norma UN94 y después para el resto de velocidades.

El estudio de los desplazamientos se ha realizado tanto de forma cualitativa como

cuantitativa. Así, observando las zonas de mayor deformación se podrá tener una idea de cómo mejorar el larguero para absorber más energía. Por otro lado, tener un registro con los valores de los desplazamientos da una idea de la rapidez con que se absorbe dicha energía.

Empezando por el estudio del desplazamiento de forma visual, se han seleccionado vistas de la pieza deformada en el último instante del ensayo. Tras observar la deformación de la prueba, se decidió que las vistas de perfil para el desplazamiento vertical y la planta para el desplazamiento horizontal ofrecían la información necesaria para el análisis cualitativo.

A continuación, se mostrará la imagen del desplazamiento horizontal sufrido por el larguero original en los distintos ensayos (ver Figura 38). Las imágenes han sido tomadas en el instante final del ensayo, momento en el que el desplazamiento es máximo.



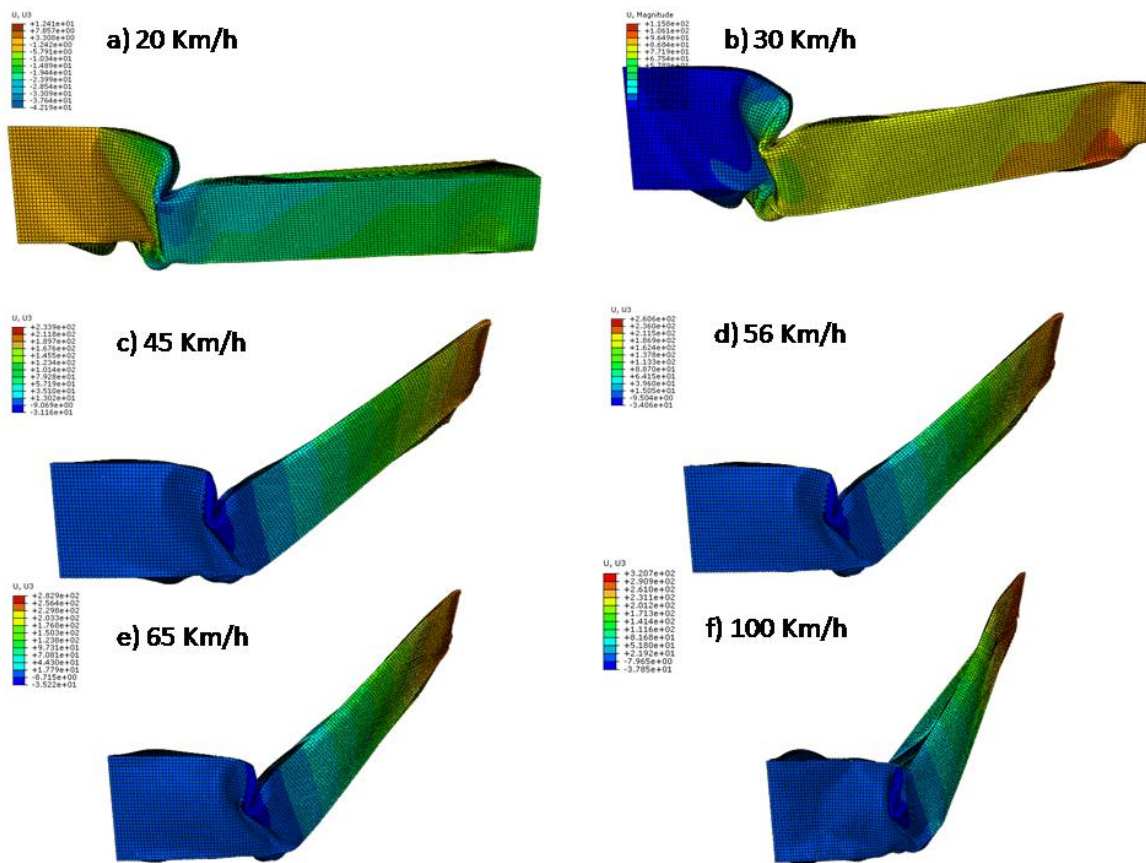
**Figura 38. Desplazamientos horizontales a diferentes velocidades de impacto para el larguero original**

La evolución de las imágenes de los impactos a distintas velocidades refleja una deformación suave en forma de curva hacia el exterior del vehículo. El cambio de sección también ha producido una pequeña variación del radio de curvatura en la deformación. Viendo estos resultados, se debe intentar que el desplazamiento horizontal sea mayor o que deforme de una manera distinta de forma que permita absorber mayor energía. Observando el rango de colores, el frontal del larguero es la sección que mayor desplazamiento ha sufrido. De esta forma, en la parte trasera del larguero se observa la aparición de pliegues que llevan asociada la absorción de energía del impacto, mientras que



la parte delantera solo se somete a desplazamientos sin la aparición de dichos pliegues. Por lo tanto, se desarrollará una nueva geometría con la que se pretende conseguir la creación de pliegues adicionales en esta zona delantera para que se absorba mayor cantidad de energía de impacto en la formación de estos.

La siguiente imagen (ver Figura 39) muestra el desplazamiento vertical del larguero original para los ensayos a distintas velocidades en el instante final.



**Figura 39. Desplazamientos verticales a diferentes velocidades de impacto para el larguero original**

La secuencia de imágenes del larguero, tomando las vistas de perfil como vista principal, da la información del desplazamiento vertical. Según se aumenta la velocidad del ensayo, el desplazamiento es mayor. La pieza queda dividida como en dos segmentos rectos que al deformar se unen y pivotan en el cambio de sección. Esta deformación proporciona resultados muy buenos en cuestión de absorción de energía. Sin embargo, si el larguero poseyese un pliegue o cambio de sección en su parte inferior delantera, existiría un segundo punto de deformación que permitiría absorber mayor energía de forma más estable.

De otra forma y para entenderlo mejor, se puede hacer una similitud con un caso diferente. Imaginando una pelota de béisbol que va a ser recepcionada por un guante, si este se abre

del todo la pelota frenará pero puede salirse de él debido a la holgura entre el guante y la pelota. Sin embargo, si el guante se cierra más y con la forma de la pelota, sumado al efecto de rozamiento entre la pelota y el guante, la absorción de la energía inercial es mayor y más estable.

Una vez finalizada la parte más cualitativa, se procede a realizar un análisis cuantitativo con los valores de los desplazamientos sobre cada eje y en magnitud. Esta información ayudará a comprobar si el modelo mejorado cumple con las nuevas especificaciones exigidas. Además, a la hora de evaluar los daños en el resto de la estructura, es necesario saber cuánto desplaza y con qué elementos periféricos golpea.

En la Tabla 6 se registran los desplazamientos máximos del análisis para los ensayos realizados a distinta velocidad. El desplazamiento máximo se recoge siempre en el último instante del ensayo (0,01s) ya que tiende a deformarse hacia afuera.

VELOCIDAD [km/h]		20	30	45	56	65	100
DESPLAZAMIENTOS MODELO ORIGINAL [mm]	MAGNITUD	70,0468	114,122	301,012	339,280	369,434	473,665
	LONGITUDINAL EJE, U1	55,5343	83,2716	124,972	155,585	180,476	277,562
	HORIZONTAL EJE, U2	42,6336	62,7239	150,491	166,198	173,466	225,117
	VERTICAL EJE, U3	2,20681	46,4251	228,785	251,560	271,697	310,870

Tabla 6. Valores de los desplazamientos del larguero original

Para tener una visión más orientativa a la hora de analizar los resultados de los desplazamientos, es conveniente realizar una gráfica con todos ellos. Así, en la Figura 40 que aparece a continuación se representan los datos expuestos en la Tabla 6:

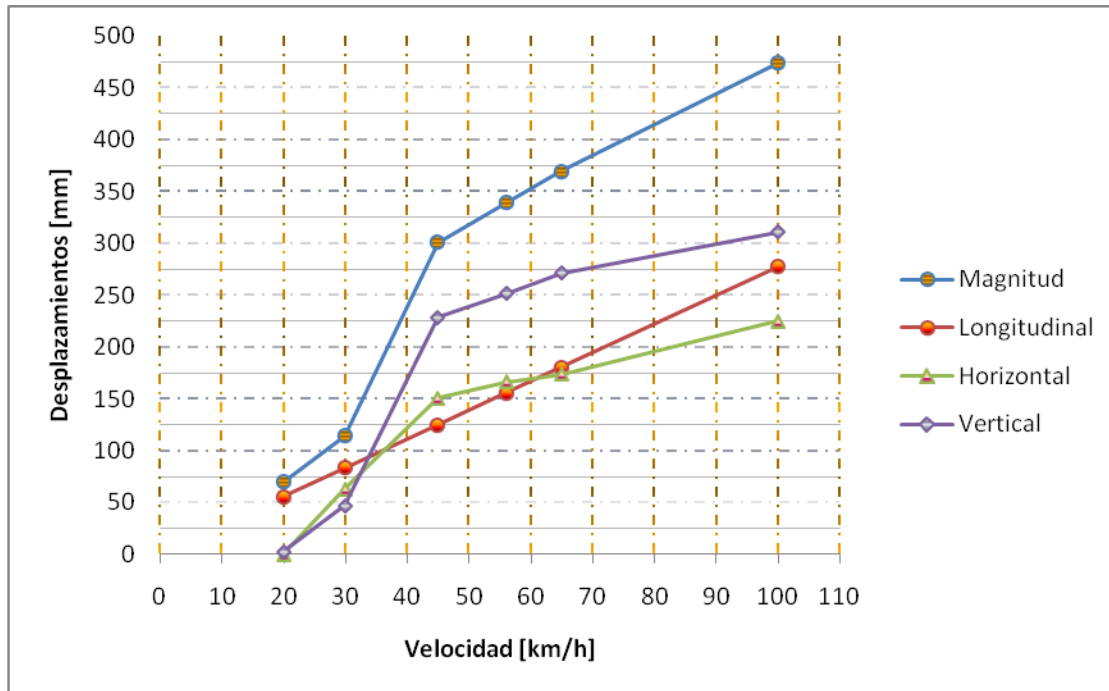


Figura 40. Desplazamientos del larguero original para ensayos a distintas velocidades

Ahora, utilizando la gráfica que se apoya en la Tabla 6 se observa un ascenso progresivo en los desplazamientos según aumenta la velocidad del ensayo. Analizando los desplazamientos en las tres direcciones, la curva correspondiente al desplazamiento vertical se encuentra bastante por encima de las curvas de desplazamiento horizontal o longitudinal. Además, estas últimas curvas registran desplazamientos similares durante todos los ensayos. La curva del desplazamiento longitudinal tiene mayor tendencia lineal lo cual es conveniente ya que de este modo se podrá prever mejor el comportamiento del larguero en cualquier situación de velocidad. Este es uno de los objetivos que se desea buscar en el nuevo modelo que se diseñe, que el resto de desplazamientos tengan la misma tendencia lineal. Por otro lado, se podría intentar que los desplazamientos adquiriesen valores similares en cualquier dirección. Al repartir esfuerzos en todas las direcciones, el valor de las reacciones en los empotramientos debería ser menor.

### 5.3 DISEÑO DEL LARGUERO MODIFICADO

El diseño del larguero modificado se realizará mediante ideas tomadas del análisis computado en el modelo original. La idea debe ser tomada de tal forma que no repercuta excesivamente en el proceso de fabricación (material, métodos de fabricación) y sobre todo que cumpla con las expectativas de seguridad para el vehículo y sus ocupantes.

Para cubrir la seguridad que ofrezca el larguero ante impactos se tienen que generar menores reacciones en los empotramientos ya que significaría que la carga transmitida es menor y la deceleración producida en el vehículo también. La forma de lograrlo es conseguir

una geometría que propicie la aparición de nuevos pliegues que llevan asociada una absorción adicional de la energía de impacto.

En las imágenes de la Figura 39 (Desplazamientos verticales larguero original) se aprecia bien como el cambio de sección actúa de pliegue en la deformación. Creando otro cambio de sección en la parte frontal inferior del larguero se consigue un pliegue que lo hará deformar en el otro sentido.

Además, el modelo real contaba con pequeños pliegues que estaban en la parte frontal y que ayudaban a controlar la deformación programada. Como los pliegues del modelo real son de dimensiones reducidas seguramente se consuma mayor gasto energético en moldear esta parte que el resto de la pieza que tiene superficies más lisas. Por ello, se debe crear un tipo de pliegue que no afecte demasiado en el proceso de fabricación y mejore los resultados ya expuestos.

Por conclusión, se deberá hacer un cambio de sección en la parte frontal inferior la cual actuará como nuevo pliegue dando lugar a una nueva deformación. Este cambio de sección no tendrá un cambio recto como el de la parte superior. El nuevo pliegue será formado por una superficie cóncava hacia el interior del larguero. En un punto situado a cierta distancia de la sección frontal se colocará la mayor cota (2cm) que existe entre esta superficie y el plano horizontal de la parte inferior que definía al modelo original.

Este pequeño cambio colocado de forma estratégica puede generar buenos resultados tanto en la deformación como en las reacciones en el empotramiento. Además, el coste de realizar una superficie curva en una gran superficie es menor que realizar pequeños pliegues igual de resistentes.

A continuación aparecerá una imagen del modelo modificado tomada del programa de diseño utilizado, Catia (ver Figura 41).

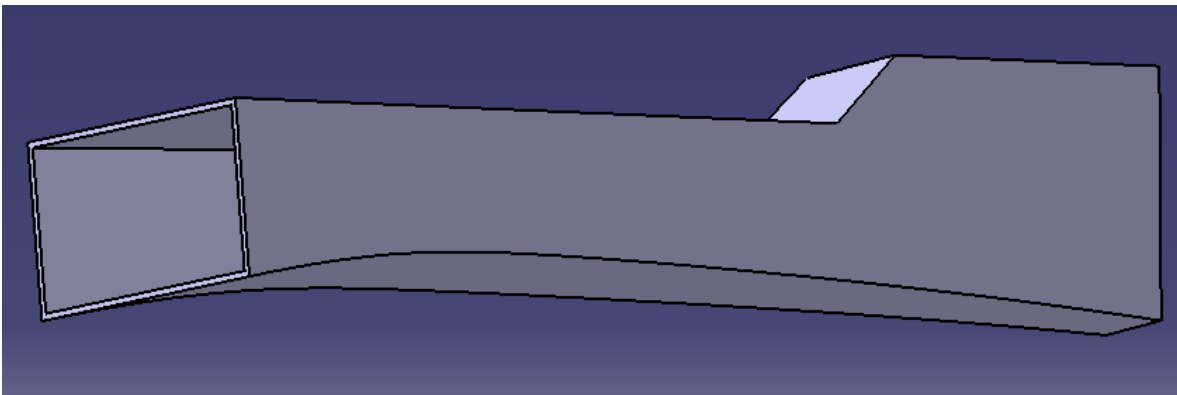
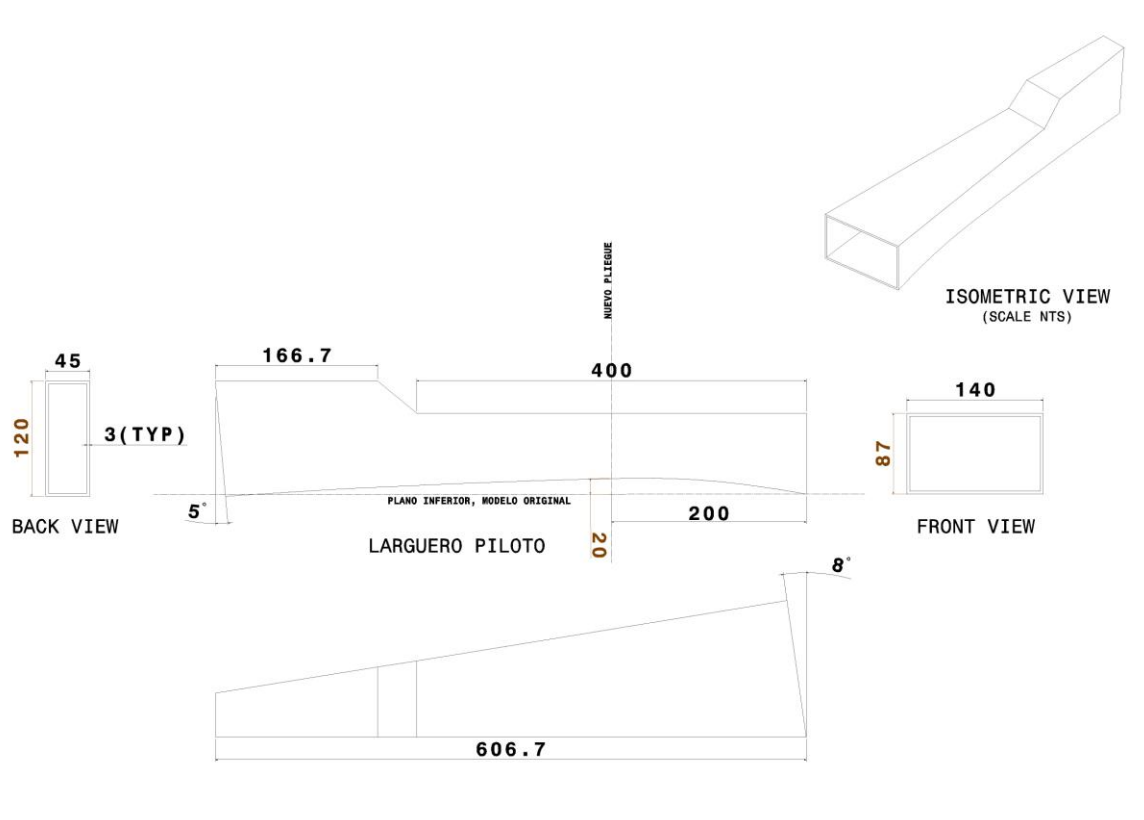


Figura 41. Larguero modificado diseñado con software CAD, Catia

En esta imagen se aprecia la curvatura impuesta en la parte inferior del larguero para que actúe de pliegue en la deformación. La combinación de este pliegue curvo y el que hay debido al cambio de sección recto producirá un cierto control en la deformación y una absorción de la energía de impacto mayor.

El plano que se muestra en la siguiente figura (ver Figura 42) corresponde al del modelo modificado. En él se ven las cotas necesarias para diseñar el nuevo modelo. En Catia, la herramienta utilizada para diseñar esta nueva superficie curva ha sido la de multi-sections surface, además de otros cambios para evitar errores con la nueva geometría.



**Figura 42. Plano larguero original modificado**

En la vista de perfil del larguero modificado aparece el pliegue a una cota de 20cm de la sección frontal, misma distancia que guarda con el siguiente pliegue y este con la sección trasera del larguero. También aparece la cota máxima (2cm) que hay entre la nueva superficie curva y la superficie lisa del modelo original.

Una vez diseñado se introdujo el modelo modificado en el análisis computacional que lleva a cabo el código comercial de elementos finitos Abaqus. Dando las mismas condiciones de contorno, el mismo material y sometiendo la nueva pieza a los mismos ensayos que el modelo original, se pide la respuesta de los parámetros necesarios para comparar ambos modelos.

## 5.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los parámetros que se utilizarán para comparar los resultados obtenidos con el modelo original vuelven a ser la visualización de las deformaciones, los desplazamientos y las reacciones en los empotramientos.

Primero se comprobará de manera visual la mejora en la deformación que se ha producido debido al nuevo pliegue deformable impuesto al inicio del larguero.

Después, con un carácter más numérico se determinará la variación de los parámetros de un modelo a otro y la tendencia que adquieren.

De esta forma, siguiendo el procedimiento, la Figura 43 muestra el desplazamiento horizontal desde una vista en planta para los ensayos a distinta velocidad sobre el modelo modificado.

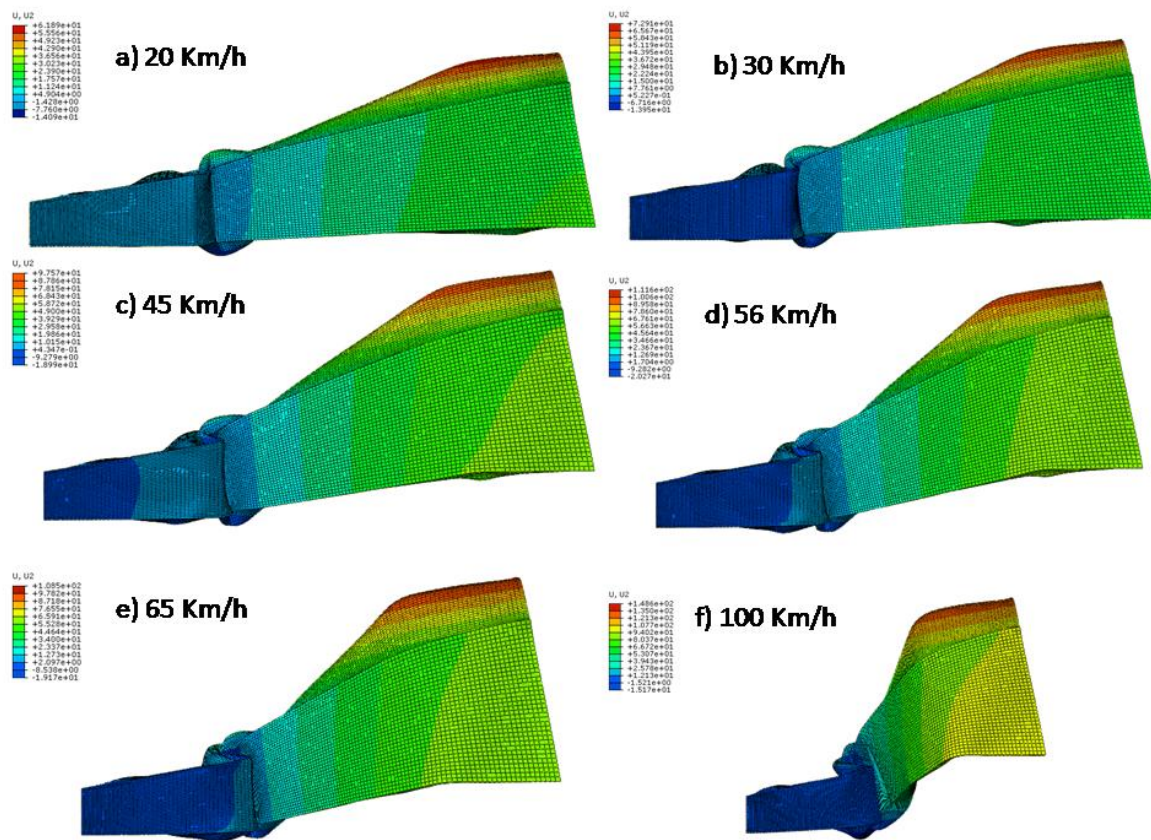


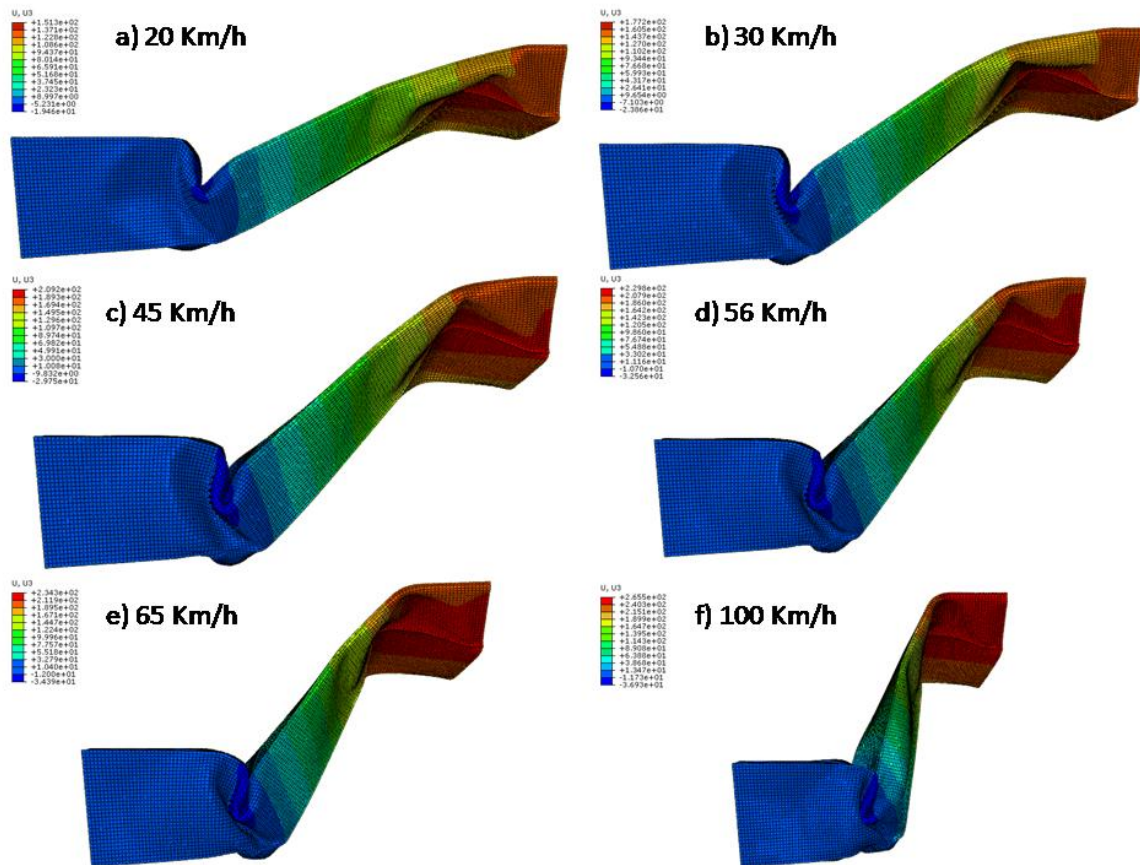
Figura 43. Desplazamientos horizontales a diferentes velocidades de impacto para el larguero modificado

Si se recuerda la misma imagen correspondiente al modelo original (Figura 38), la deformación se producía con forma de curva hacia el exterior. En este caso, la parte frontal del modelo modificado se desplaza hacia el exterior pero formando una curva hacia el



interior. La forma que describe el larguero deformado es igual que la expuesta en la analogía con el guante de beisbol (apartado 5.2). Se produce una deformación más amorfa con un contacto mayor entre el larguero y el objeto que causa el impacto sobre este para absorber mejor la energía cinética. El ensayo para 100km/h refleja mejor la forma resultante por un impacto frontal. Además, el nuevo pliegue genera que todo el larguero experimente una torsión, la cual se observa en el giro que experimenta el larguero mostrado en esta vista en planta.

El objetivo de conseguir una forma amorfa en el eje “y” después del impacto ha cumplido con las expectativas. Si se consigue los mismos resultados en el desplazamiento vertical que en el horizontal, la nueva geometría tendría bastantes posibilidades para cumplir el resto de requisitos que debe cumplir la mejora del larguero. Así, la Figura 44 contiene la vista de perfil para observar la deformación en dirección vertical (eje “z”) del larguero modificado.



**Figura 44. Desplazamientos verticales a diferentes velocidades de impacto para el larguero modificado**

La representación del desplazamiento vertical en los ensayos a distintas velocidades ayuda a observar la evolución de la geometría residual del impacto. Así, usando el ensayo que registra la mayor deformación (ensayo a 100km/h), se puede cerciorar que el resultado visual de la deformación en el modelo modificado es el esperado. En este plano, el segundo

pliegue ha producido una deformación en el otro sentido al del pliegue recto y el desplazamiento en la dirección “z” parece considerable. Este segundo pliegue se debe a la generación de momentos debido a la carga de velocidad constante sobre el punto de máxima cota de la superficie curva (2cm).

Por tanto, el estudio realizado de forma visual para comparar que la deformación final en el larguero es el esperado. La figura resultante del larguero tras un impacto queda con geometrías más amorfas. Con esta irregularidad en la deformación se espera producir un reparto de los esfuerzos sobre la pieza.

Para evaluar de forma cuantitativa el estudio de los desplazamientos, se ha elaborado un registro en la Tabla 7 con los valores del desplazamiento máximos en magnitud y en todos los ejes principales del larguero modificado. El instante de la toma de información vuelve a ser el último del ensayo. El uso de esta tabla principalmente es para cuantificar de alguna manera los desplazamientos máximos y ver si salen resultados lógicos.

VELOCIDAD [km/h]		20	30	45	56	65	100
DESPLAZAMIENTOS MODELO MODIFICADO [mm]	MAGNITUD	150,965	186,269	240,122	276,768	299,595	394,608
	LONGITUDINAL EJE X, U1	55,5153	83,3032	124,993	155,607	180,598	277,666
	HORIZONTAL EJE Y, U2	55,4332	66,5071	87,5159	99,8546	100,605	136,180
	VERTICAL EJE Z, U3	128,979	152,753	185,409	205,952	216,841	245,096

Tabla 7. Valores de los desplazamientos del larguero modificado

A continuación, mediante la Figura 45, se mostrará todos los desplazamientos recogidos en la Tabla 7 correspondientes al modelo modificado.



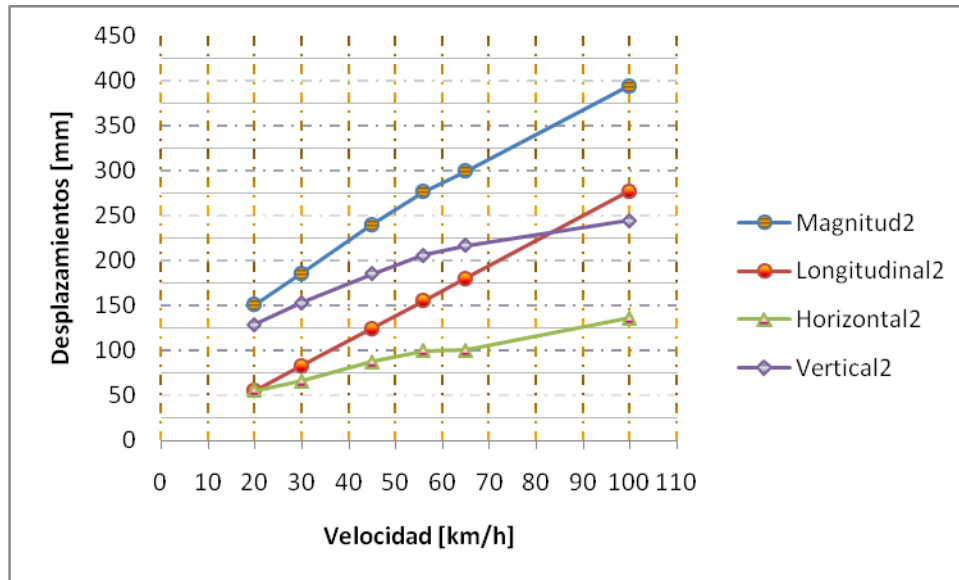


Figura 45.Desplazamientos del larguero modificado para ensayos a distintas velocidades

Dicha gráfica muestra como la tendencia de todas las funciones que describen los desplazamientos ha adquirido mayor linealidad. Una función recta siempre proporciona mejores estadísticas para previsiones ya que en cualquier situación actuará de manera proporcional. Por tanto, este resultado es uno de los esperados. Además, fijándose en las tres curvas inferiores correspondientes a los desplazamientos en los ejes principales, el valor de estos desplazamientos se recoge en un intervalo menor, es decir, se aproximan más a un valor centralizado. Así, el reparto de esfuerzos sobre el larguero será menor y como consecuencia las reacciones en los empotramientos. Por otro lado, las curvas de desplazamiento vertical y longitudinal que antes no cortaban en ningún punto, en el nuevo modelo a partir de un momento la curva de desplazamiento longitudinal se sitúa por encima de la vertical. La supremacía del desplazamiento longitudinal al final del ensayo genera menores deceleraciones en esta dirección sobre el vehículo.

Una vez observado el nuevo comportamiento que está ofreciendo el modelo modificado, el siguiente paso es comparar sus resultados numéricos con los del modelo original. Para ello, a continuación se dispondrá de una serie de gráficas comparando cada desplazamiento entre el modelo original y el modificado. Este modo de contrastar mediante funciones ayudará a estudiar la variación de los parámetros entre modelos y pensar en lo que ello conlleva.

A continuación, en las Figura 46, Figura 47, Figura 48 y Figura 49 se mostrará las gráficas del desplazamiento en magnitud, vertical, horizontal y longitudinal correspondientemente.

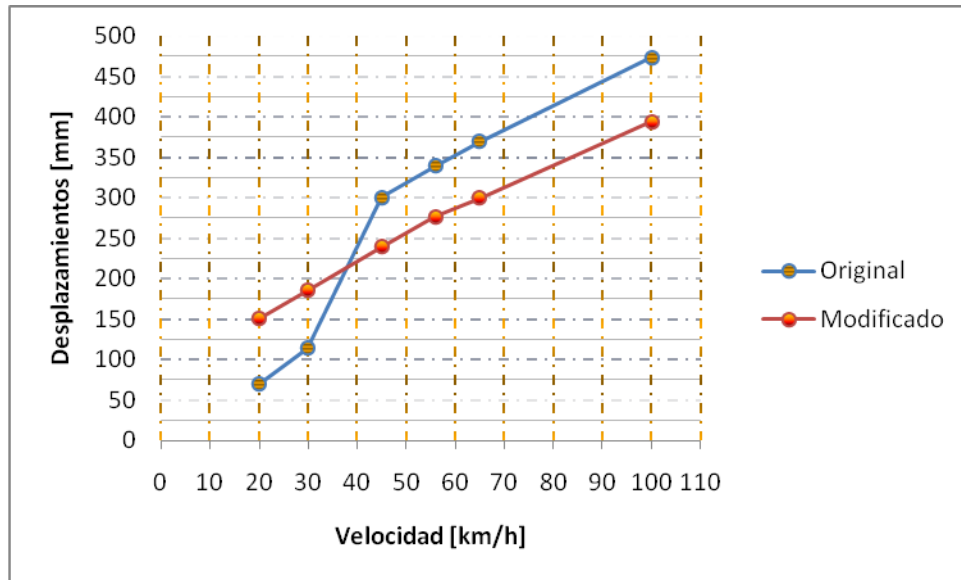


Figura 46. Desplazamiento en Magnitud

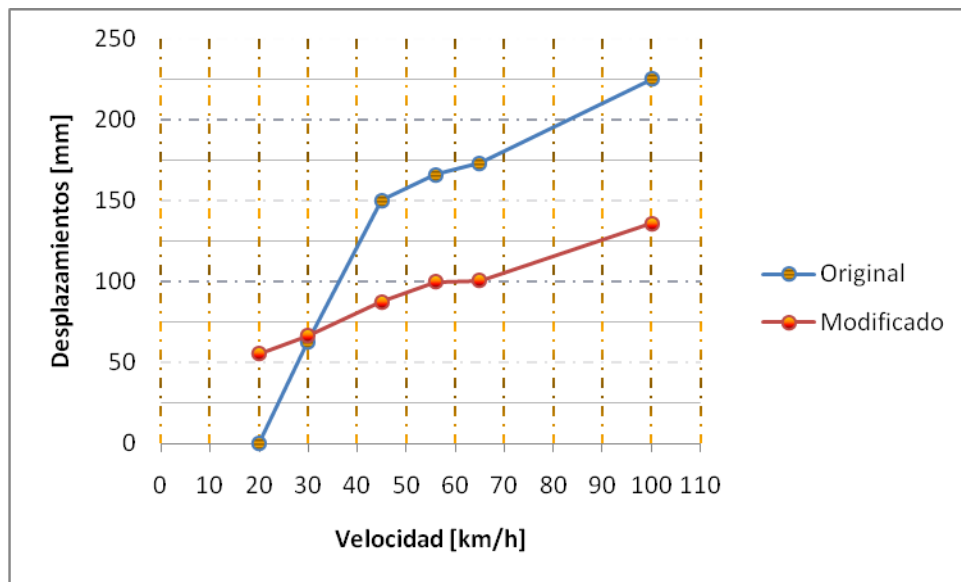


Figura 47. Desplazamiento Vertical

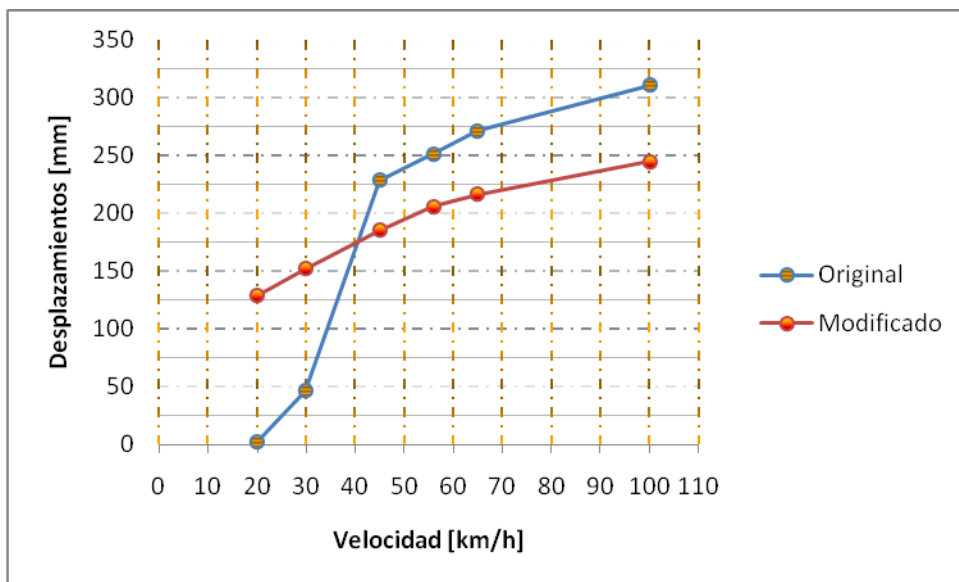


Figura 48. Desplazamiento Horizontal

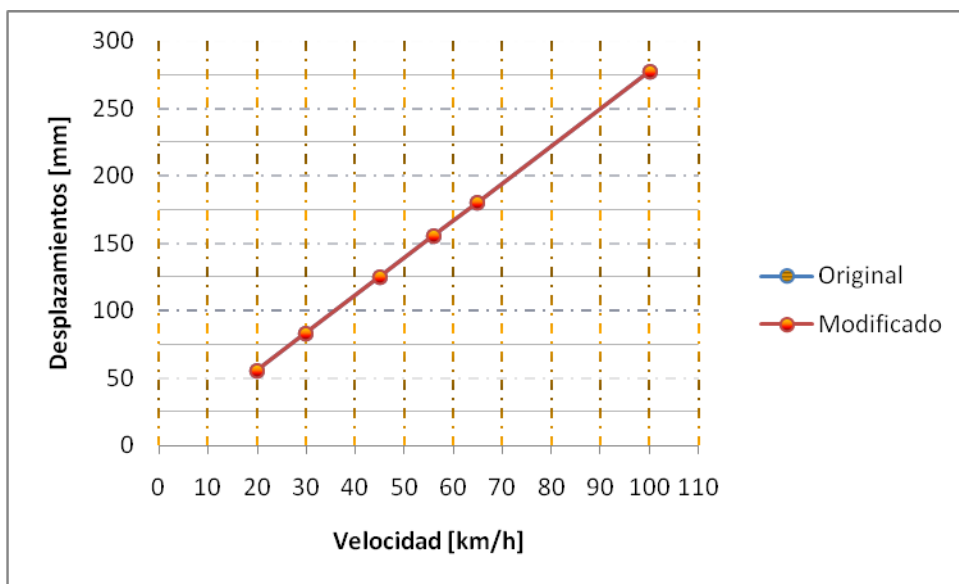


Figura 49. Desplazamiento Longitudinal

En la Figura 46, Figura 47 y Figura 48 correspondientes a la comparación de los desplazamientos en magnitud, vertical y horizontal, parecen tener el mismo comportamiento. A bajas velocidades de ensayo, los desplazamientos son mayores en el modelo modificado que en el original. Sin embargo, como el nuevo larguero mantiene una tendencia más lineal en las curvas de los desplazamientos que en el larguero original, las curvas se cruzan para situar por encima los valores de los desplazamientos del modelo original. Una gran deformación es conveniente ya que significa que se absorbe una considerable cantidad de energía durante la colisión. Sin embargo, los nuevos

desplazamientos en la mayoría del tiempo son menores y los esfuerzos deberían ser mayores. Por ello, se espera conseguir una disminución en los valores de las reacciones en función del tiempo debido a la tendencia lineal que sigue el modelo modificado. Además, como las mayores reacciones del larguero original se encontraban al inicio del ensayo y el nuevo modelo presenta mayores desplazamientos en esta franja, los puntos máximos de las curvas de estos deberían ser menores en la nueva geometría.

La Figura 49 representa los desplazamientos longitudinales frente a la velocidad de los ensayos. En ella, las curvas de ambos modelos toman valores prácticamente iguales manteniendo la tendencia lineal. El nuevo modelo no ofrece ninguna diferencia frente al modelo original en este carácter, por lo que el parámetro del desplazamiento longitudinal se mantiene estable. No se ha conseguido modificar este factor pero sigue teniendo un buen comportamiento.

Por tanto, analíticamente se ha visto como los desplazamientos a modo general adquieren valores más grandes al inicio del ensayo del nuevo modelo para después mantenerse constante pero por debajo del modelo original. Además la tendencia que siguen estos parámetros es lineal. Con estos resultados se espera que el valor de las reacciones en los empotramientos del larguero sea menor.

Para ello, primero se procede a comparar los modelos en cuestión usando el caso fundamental que recoge la norma UN94 (ensayo a 56km/h). Al ser un caso concreto, se podrá ver la evolución del parámetro en función del tiempo de ensayo. Este análisis tiene grandes ventajas como observar los puntos temporales donde se hacen máximas las reacciones y ver como deforma en estos instantes. La Figura 50 muestra la gráfica que compara las reacciones en ambos modelos en función del tiempo de ensayo realizado a 56km/h.

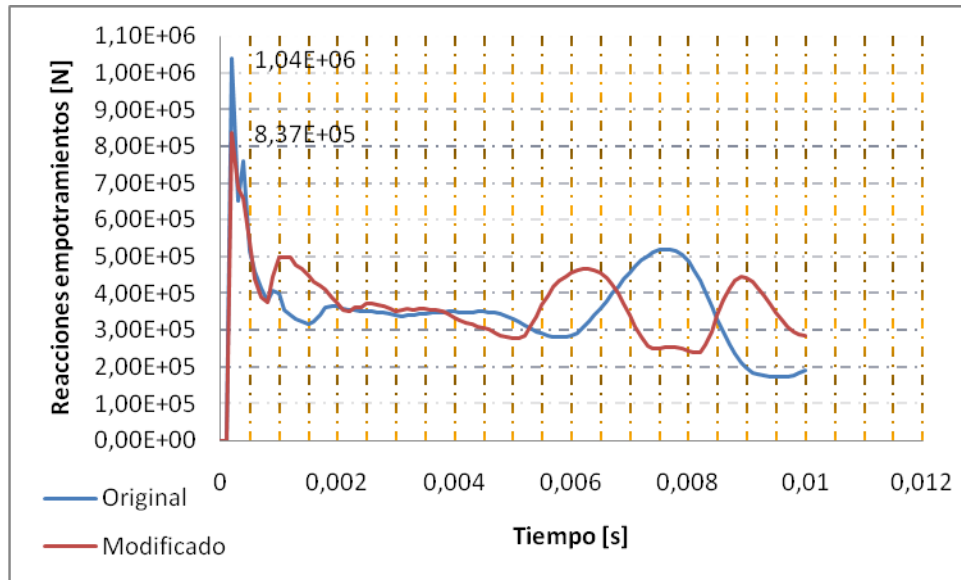


Figura 50. Reacciones en empotramiento en función del tiempo

Como puede observarse, la curva del modelo modificado tiene varios máximos de las reacciones, ninguno de los cuales supera al mayor de los máximos del modelo original. Este era uno de los objetivos buscados cuya finalidad consistía en reducir estas reacciones que se transmitían al resto del bastidor. Así, la curva del modelo modificado registra picos de menor valor, y a mitad del ensayo se estabilizan los valores de las reacciones en torno a una media.

Para complementar estos resultados, se decidió estudiar los picos máximos de las reacciones para cada tipo de ensayo y compararlos entre modelos. Esta comparación ayudará a visualizar la diferencia de comportamientos entre los dos tipos de largueros a distintas velocidades. Así, en la Figura 51 se representan los puntos máximos de las reacciones en el empotramiento tanto del modelo original como del modificado para los ensayos a distintas velocidades.

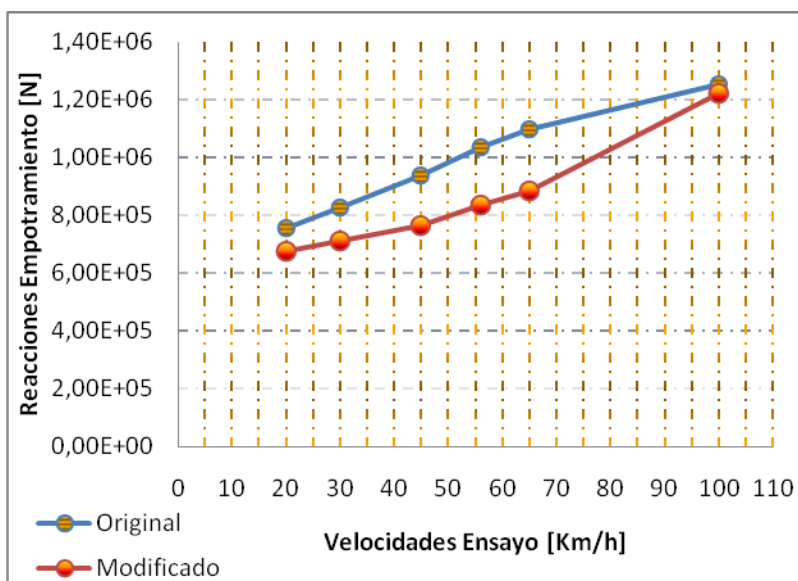


Figura 51. Reacciones en empotramiento en ensayos a distintas velocidades

En la gráfica se observa como los valores de todas las pruebas en el modelo modificado han salido inferiores al modelo original. Por otro lado, la tendencia lineal que consiguieron las curvas de los desplazamientos en el nuevo larguero se repite para las curvas de las reacciones. Con ello, la predicción de la respuesta ante colisiones frontales a cualquier velocidad tendrá mayor precisión. Esta tendencia lineal también ayudará a diseñar el resto de elementos de la estructura del parachoques de forma estandarizada.

Para tener una perspectiva más rigurosa de la variación de las reacciones se ha decidido calcular el porcentaje de la disminución entre el modelo original y el modificado. Para ello, se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$Dis. \% = \frac{ReacciónOrig - ReacciónModif}{ReacciónOrig} \cdot 100$$

• Donde:

- *ReacciónOrig* = Valor de las reacciones en el empotramiento del modelo original
- *ReacciónModif* = Valor de las reacciones en el empotramiento del modelo modificado

De esta forma, como la curva de las reacciones no es lineal, se calculan los porcentajes de disminución de las reacciones para todos los ensayos a distintas velocidades. A continuación, en la Tabla 8 se registran los valores de estos porcentajes:

ENSAYO [km/h]	20	30	45	56	65	100
<b>Dis.%</b>	10,33	13,92	18,40	19,52	19,55	2,4

Tabla 8. Porcentajes de disminución en las reacciones entre el modelo original y el modelo modificado

En esta tabla se puede ver que la disminución de las reacciones ha adquirido un valor bastante importante tomando un valor medio en torno al 15%. Estos resultados confirman que el modelo modificado ofrece mejoras en cuanto a la absorción de la energía de impacto.

## 6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto ha servido para recopilar información sobre la importancia que ofrece el larguero en la seguridad de un vehículo. Sin este elemento, la seguridad del ocupante estaría totalmente desprotegida ante choques frontales.

El correcto funcionamiento del larguero está más influenciado por la geometría del mismo que por el material del que este fabricado. La prueba está en que los vehículos, por norma general, disponen de largueros del mismo material, acero al boro de alta resistencia. Sin embargo, cada modelo de vehículo tiene un modelo de larguero diferente ya sea para adaptarse al espacio que hay alrededor del motor o para soportar los esfuerzos que las características del vehículo en cuestión exigen.

Atendiendo principalmente a este aspecto, la geometría del larguero, en el modelo original se observó que un simple cambio de sección genera nuevas zonas de máxima deformación. Además, la inclinación de la sección frontal hacia el exterior también ayuda a producir un desplazamiento de los nodos hacia este mismo lado.

En el modelo modificado se ha comprobado que al generar nuevas zonas de pliegues en el larguero, el comportamiento frente a la absorción de choques mejora. Se ha observado como las reacciones en el empotramiento del larguero, y por tanto las que se transmitirán a la bancada, han disminuido considerablemente. Además, el reparto de los desplazamientos en todas direcciones se vuelve más homogéneo y se consigue una tendencia lineal en las curvas de estos desplazamientos.

En el estudio de este proyecto se han visto tres tipos de pliegues: los de dimensiones reducidas situados únicamente en la parte frontal del larguero y que fueron simplificados, el producido por el cambio de sección recto y el resultante del punto de máxima cota de la superficie curva del modelo modificado. Los pliegues de dimensiones reducidas controlan mejor la deformación programada pero son más complejos a la hora de fabricar. El pliegue debido al cambio de sección da buenos resultados y es idóneo si se quieren colocar varios escalones sobre la misma superficie. Sin embargo, en el estudio de este proyecto se ha descubierto que una simple superficie curva también realiza la función de pliegue. Así, una modificación tan básica como es dar cierta curvatura a una superficie ofrece una excelente respuesta a la deformación.

En piezas mecánicas no es necesario introducir equipos electrónicos para mejorar sus funciones. Modificaciones en su forma o en el material de la pieza es suficiente para obtener valores altamente eficaces.

Por tanto, en futuros trabajos se podría estudiar la posibilidad de crear un larguero en el que todas sus caras sean superficies curvas e incluso con varios puntos de cota máxima actuando como un “acordeón”. Además, se podría estudiar la reacción ante distintos tamaños de curvaturas entre pliegue y pliegue. Con ello se conseguiría crear multitud de pliegues deformables con un larguero deformado amorfamente y resultados de los parámetros



homogéneos. Un número elevado de este tipo de pliegues puede causar exceso en la deformación de modo que algún elemento de la parte frontal del vehículo entre en el habitáculo de los ocupantes. La solución para llegar a una deformación intermedia es realizar varios modelos de larguero con este tipo de pliegues y analizarlos.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.diariosur.es/axarquia/201501/05/heridos-choque-frontal-entre-20150105192036.html> Accedido por última vez: 02/04/2017
- [2] circulaseguro.com [Internet]. Portugal; 21 Noviembre 2015 [27 Mayo 2017]. Disponible en: <http://www.circulaseguro.com/si-el-frontal-de-tu-coche-se-dobla-es-que-esta-bien-hecho/> Accedido por última vez: 05/04/2017
- [3] e-mediadrive.com [Internet]. <http://culturavial.com/seguridad-vial/que-es-seguridad-vial.html> Accedido por última vez: 05/04/2017
- [4] <http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/principales-cifras-siniestralidad/Las-principales-cifras-2015.pdf> Accedido por última vez: 08/04/2017
- [5] <http://culturavial.com/accidentes-viales/magnitud-del-problema.html> Accedido por última vez: 17/04/2017
- [6] [http://revista.dgt.es/es/noticias/nacional/2017/01ENERO/0103balance-accidentes-2016.shtml#.WMp8I281\\_IU](http://revista.dgt.es/es/noticias/nacional/2017/01ENERO/0103balance-accidentes-2016.shtml#.WMp8I281_IU) Accedido por última vez: 23/04/2017
- [7] <http://www.circulaseguro.com/casi-25-anos-de-reduccion-de-muertos-en-accidentes-de-traffic/> Accedido por última vez: 24/04/2017
- [8] <http://www.ancosev.org/normas-de-homologacion-de-impacto-frontal-y-lateral-un94-y-un95-para-vehiculos/> Accedido por última vez: 07/05/2017
- [9] <http://www.inpenor.com/2014/02/28/la-evolucion-del-paragolpes/> Accedido por última vez: 12/05/2017
- [10] <http://www.buscadordetalleres.com/blog/por-que-al-tener-un-impacto-el-coche-se-deforma-mas-ahora/> Accedido por última vez: 23/05/2017
- [11] [http://www.elchapista.com/nuevas\\_aleaciones\\_carroceria.html](http://www.elchapista.com/nuevas_aleaciones_carroceria.html) Accedido por última vez: 23/05/2017
- [12] [http://www.elchapista.com/aceros\\_de\\_alta\\_resistencia.html](http://www.elchapista.com/aceros_de_alta_resistencia.html) Accedido por última vez: 25/05/2017
- [13] [http://www.ancosev.org/wp-content/uploads/2015/03/ANCOSSEV\\_UN94.pdf](http://www.ancosev.org/wp-content/uploads/2015/03/ANCOSSEV_UN94.pdf) Accedido por última vez: 28/05/2017
- [14] <http://ingemecanica.com/tutoriales/CategoriasdeVehiculos.html> Accedido por última vez: 28/05/2017

- [15] <http://www.measurecontrol.com/catia-v5r17/> Accedido por última vez: 03/06/2017
- [16] <http://studylib.es/doc/5532410/tabla-de-unidades-consistentes-en-abagus> Accedido por última vez: 03/06/2017
- [17] G. R. Johnson, W. H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strains rates and high temperatures. In: Proceedings of the seventh international symposium on ballistics, 1983
- [18] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=AMEAL00&ckck=1> Accedido por última vez: 04/06/2017
- [19] <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn100.html> Accedido por última vez: 04/06/2017
- [20] Lee, M., Yoo, Y.H., Analysis of metal armour systems, International Journal of Impact Engineering, Vol.25, pp. 819-829, Seoul 2001
- [21] <http://www.foroaircooled.com/t1236-a-que-temperatura-trabajan-nuestros-motores> Accedido por última vez: 07/06/2017
- [22] Apuntes de la asignatura de “Mecánica de Sólidos”, curso 2015-2016.